

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra aplikované mechaniky

Výpočtová analýza cyklistické přilby

Numerical Analysis of Bicycle Helmet

Student:

Ondřej Hurník

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Zdeněk Poruba, Ph.D.

Ostrava 2011

Zadání bakalářské práce

Student:

Ondřej Hurník

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

3901R003 Aplikovaná mechanika

Téma:

Výpočtová analýza cyklistické přilby
Numerical Analysis of Bicycle Helmet

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

- 1) Vypracujte řešerši stávajících konstrukčních a materiálových řešení a dále norem a testovacích metod cyklistických přileb
- 2) Proveďte napět'ově-deformační analýzu přilby dle doporučených zátěžných podmínek
- 3) Realizujte případovou studii - sken hlavy, sken přilby, řešení dle skutečných okrajových podmínek
- 4) Definujte závěry a doporučení pro konstrukci cyklistické přilby na míru

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Kolář V., Němec I., Kanický V. : FEM Principy a praxe metody konečných prvků. Computer Press, 1997, ISBN 80-722-6021-9.
- [2] Hoschl C. : Pružnost a pevnost ve strojnictví. SNTL / Alfa, Praha, 1971
- [3] COOK, R. D. *Finite Element Modeling for Stress Analysis*. 1st edition. New York : Wiley & Sons, 1995. 320 s. ISBN 0-471-10774-3.
- [4] KWON, Young W a Hyochoong BANG. *The finite element method using MATLAB*. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, c2000, 607 p. ISBN 08-493-0096-7.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Zdeněk Poruba, Ph.D.**

Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017



doc. Ing. Radim Halama, Ph.D.
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty



Místopřísežné prohlášení

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě podpis studenta.....

Prohlašuji, že

- Jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě:

.....

podpis

Jméno a příjmení autora práce: Ondřej Hurník

Adresa trvalého pobytu autora práce: Čkalovova 848, Ostrava – Poruba, 708 00

Poděkování

Tato práce vznikla na základě zájmu společnosti Invent Medical vyrábět nové inovativní cyklistické přilby s větším zaměřením na bezpečnost. Rád bych touto formou poděkoval právě celé společnosti Invent Medical za poskytnuté vybavení a technologie potřebné pro získání modelu přilby. Zároveň bych chtěl touto cestou poděkovat následujícím lidem za neocenitelnou pomoc při realizování této práce. Jsou jimi:

- Ing. Zdeněk Poruba Ph.D., kterému děkuji za skvělé vedení práce, ochotu a poskytnutý čas při dobrovolné výuce MKP výpočtů v programu Ansys Workbench,
- doc. Ing. Radim Halama Ph.D., díky kterému vznikl samotný experiment korelace digitálního obrazu,
- Bc. Petr Chapčák, jenž mi věnoval svůj čas pro výuku 3D skenování a vyladění výsledného naskenovaného modelu přilby

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zaměřuje na problematiku cyklistických přileb. Popisuje jejich technologii výroby a materiály, které jsou při ní používány. Hlavním cílem je získat co nejvíc informací o testovacích metodách a materiálových vlastnostech cyklistické přilby, aby následně bylo možné využít těchto poznatků, pro navazující diplomovou práci, při které bude možné provést dynamické testování přilby, dle zásad testování přileb stanovených evropskou normou ČSN EN 960 a ČSN EN 1078. Součástí práce je zároveň popsání metodiky 3D skenování, jež byla použita pro získání geometrie modelu, která sloužila pro definici numerického modelu. Tento numerický model byl následně využit pro stanovení správných materiálových vlastností přilby. Námi stanovené materiálové vlastnosti vycházely z chování přilby při experimentu pomocí optické metody korelace digitálního obrazu. Závěrem bylo srovnání výsledků MKP výpočtu s provedeným experimentem.

Klíčová slova

Cyklistická přilba, testovací metody, experiment DCIM, numerická analýza

Abstract

This bachelor thesis focuses on the issue of cycling helmets. Describes their production technology and the materials used in it. The main objective is to get as much information as possible about the test methods and material characteristics of the cycling helmets so that it is possible to use this knowledge for subsequent dissertation in which dynamic testing of helmets can be performed per the principles determined by the European standard ČSN EN 960 and ČSN EN 1078. Integral of the work is also a description of the 3D scan for obtain the 3D model, which was used to define the numerical model. This numerical model was subsequently used to determine the right material properties of the helmet. Material properties determined by us were derived from the behavior of the helmet during the experiment digital image correlation. Finally, we compared the results of FEM calculation with the experiment.

Keywords

Cycling helmet, testing methods, experiment DCIM, numerical analysis

Obsah

Abstrakt.....	iv
Klíčová slova	iv
Abstract.....	iv
Keywords	iv
1 Úvod	3
2 Cyklistické přilby	4
2.1 Materiál pro výrobu přileb	4
2.1.1 EPS	5
2.1.2 Akrylonitrilbutadienstyren (ABS)	5
2.1.3 Uhlíkové vlákna.....	5
2.2 Rozložení materiálů na testované přilbě	6
3 Technologie zpracování přileb	7
3.1 In-Mold	7
3.2 Double In-Mold.....	7
4 Tvorba geometrie výpočtového modelu 3D skenováním.....	8
4.1 Rozdělení skenerů	8
4.1.1 Dotykové skenery	8
4.1.2 Laserové skenery	8
4.1.3 Optické skenování	8
4.2 Skenování pomocí Artec Eva.....	9
4.3 Skenování pomocí Atos Core.....	13
4.4 Výstupní data 3D skenerů	14
4.4.1 Přípona *.STL (STereoLithography).....	14
4.4.2 STL geometrie modelu přilby získaná skenováním	14
5 Normy	15
5.1 CSN EN 960.....	15
5.1.1 Stanovení geometrie maket hlavy	15
5.1.2 Materiály a všeobecné vlastnosti.....	17
5.2 CSN EN 1078+A1	18
5.2.1 Stanovení zorného pole	19
5.2.2 Schopnost tlumení nárazu.....	19
5.2.3 Trvanlivost.....	19

5.2.4 Upevňovací systém.....	20
5.2.5 Zkoušení maket hlavy.....	20
5.2.6 Postup při zkoušce.....	20
5.2.7 Stanovení schopnosti tlumení nárazu	21
5.2.8 Zkušební zařízení.....	22
5.2.9 Umělé stárnutí:	22
6 Experimentální pružnost – Metoda korelace digitálního obrazu.....	23
6.1 Přetvoření bodů	24
6.2 Postup měření metody korelace digitálního obrazu	25
6.3 Vlastní realizace měření metodou digitální korelace	28
6.4 Vyhodnocení experimentu	29
6.5.1 Celkové posunutí	29
6.5.2 Výsledné deformace	30
7 Výpočet metodou konečných prvků.....	32
7.1 Princip MKP.....	32
7.2 Zvolené materiály.....	33
7.3 Tvorba geometrie	34
7.4 Tvorba konečnoprvkové sítě	35
7.5 Aplikace okrajových podmínek	36
7.6 Vyhodnocení výsledků.....	37
8 Závěr	39 - 40
Literatura.....	41 – 42
Seznam symbolů a zkratk.....	43
Seznam tabulek.....	43
Seznam obrázků.....	44

Kapitola 1

Úvod

Cílem předkládané práce je zvládnout přenos reálné součásti do PC modelu a její využití při analýze metodou konečných prvků. Těžiště práce je věnováno naladění materiálových vlastností komponent přilby tak, aby bylo dosaženo co nejlepší shody numerického výpočtu s provedeným experimentem.

Pro realizaci takového výpočtu, je zapotřebí 3D modelu přilby, který je možné získat nejsnadněji za použití metody Reverzního inženýrství. Zmiňovaný model přilby byl vytvořen na základě spolupráce se zadavatelem práce společností Invent Medical. Právě společnost Invent Medical nastínila svůj zájem o vyvinutí vlastního prototypu helmy se zaměřením na zvýšení bezpečnostní funkce oproti standardním cyklistickým přilbám. K realizaci tohoto nového projektu by tedy mohla výpočtová analýza cyklistické přilby, jež je součástí práce přispět. Spolupráce se společností Invent Medical byla navázána již v úvodu v rámci skenování a následného vyladění výsledného 3D modelu přilby.

Práce se dále zaměřuje na získání poznatků ohledně správné konstrukce cyklistických přileb a jejich testovacích metodách čerpáním ze dvou evropských norem ČSN EN 960 a ČSN EN 1078, načež dále pokračuje sepsáním rešerše již dříve zmiňovaného experimentu spadajícího do oblasti experimentální pružnosti. V tomto experimentu byl fyzický model přilby podroben zkoušce optické metody digitální korelace obrazu, s jehož výsledky je v závěru práce srovnáván výpočet přilby na základě stejných okrajových podmínek metodou konečných prvků.

Cyklistické přilby

Cyklistické přilby jsou dnes nedílnou součástí výbavy většiny cyklistů. Patří do ní právě díky skutečnosti, že dle statistiky dochází k úmrtí následkem poranění hlavy v 75 % případů. Proto se výrobci přileb snaží co nejlépe zdokonalit jejich bezpečnostní složku výběrem správných materiálů s co nejlepšími mechanickými vlastnostmi, ale zároveň i správnou technologií výroby. Přilba se skládá ze 3 hlavních částí. Tou nejdůležitější je výplňová pěna, jenž má na starost pohlcení nárazu při pádu. Tato tuhá pěna je pokryta skořepinou, která ji udržuje pohromadě a zároveň umožňuje prokluz helmy způsobený vlivem kontaktu s jinou plochou či tělesem, ke kterému může dojít při pádu z kola. Spojení těchto dvou částí je v levných případech realizováno za použití lepidel, avšak nejčastějším a zároveň nej kvalitnějším řešením je technologie In – Mold, popřípadě Double In-Mold, při které dochází ke spojení pěny a skořepiny, na základě tlaku a tepla páry, jenž je vstřikovávána do formy. Třetí hlavní částí přilby je upevňovací systém, nejčastěji v podobě řemínku, jehož způsoby testování jsou popsány v normě ČSN EN 1078. V této normě jsou stanovena bezpečnostní kritéria, které musí být bezpodmínečně splněna, aby mohla být přilba uvedena na trh. V praxi dochází k testování přileb na základě pádové zkoušky. Tuto pádovou zkoušku můžeme také simulovat díky numerické analýze za použití metody konečných prvků. Díky tomuto řešení ušetříme spoustu zkušebních vzorků v testovací fázi výroby přilby.

2.1 Materiál pro výrobu přileb

Cyklistická přilba by měla efektivně ztlumit náraz do hlavy nositele způsobený při pádu z kola, či srážky s jiným objektem. Při výrobě tedy volíme materiály s nízkou hmotností a zároveň vysokou pevností a pružností, abychom splnili předpoklady přilby chovat se jako účinná ochrana v případě nárazu. Ideálním materiálem schopným pohltit velké nárazy je polystyrenová pěna. Hustota této pěny je jedním z hlavních faktorů ovlivňující rozsah odolnosti přilby. Vysoká hustota odolává větším nárazům, avšak pěna s menší hustotou umožní měkčí dopad, se kterým však souvisí i nebezpečí proražení přilby hlavou.

Polystyrenovou pěnou s ideálními mechanickými vlastnostmi je pěna EPS. Tuto pěnu pokrývá skořepina z plastu ABS, zvyšující pevnost a zároveň odolnost přilby proti vniknutí jiných předmětů. Pevnost přilby můžeme nadále zvýšit přidáním výztuží v podobě uhlíkových vláken.

2.1.1 EPS

Jedná se o expandovaný neboli pěnový polystyren, který se vyznačuje vysokou pevností, tvrdostí, odolností proti namáhání tlakem a velmi nízkou hmotností. EPS nevyvolává při nárazu žádný zpětný odraz, z čehož plyne trvalé přetvoření pěny, jenž pohlcuje energii vzniklou při nárazu. Právě z důvodu trvalých deformací je nutné přilby vyrobené z EPS materiálu po větším nárazu vyřadit a nahradit novou přilbou. Hustota EPS při výrobě přileb se pohybuje v rozmezí 71 – 101 kg/m³. [1]

2.1.2 Akrylonitrilbutadienstyren (ABS)

Je amorfni termoplastický průmyslový kopolymer. Hlavní funkcí plastu ABS je zvýšit celkovou pevnost a odolnost konstrukce přilby. Rozhodující vlastnosti tohoto materiálu pro použití při výrobě cyklistických přileb jsou: velká tuhost, pevnost a zároveň houževnatost i při snížené okolní teplotě. Zároveň zvládá pohlcovat rázy, tlumit vibrace a vyznačuje se i vysokou odolností proti šíření trhlin či nízkou tepelnou vodivostí. Hustota plastu ABS je stanovena na hodnotu 1045 kg/m³. [2]

2.1.3 Uhlíkové vlákna

Jsou to dlouhá vlákna o průměru 5–8 µm obsahující atomy uhlíku, které jsou spojovány do mikroskopických krystalů o paralelní orientaci vůči dlouhé ose vlákna. Tímto uspořádáním krystalů, získávají vlákna vysokou pevnost. Využívají se především u odlehčených modelů, kde slouží jako výztuže pro dosažení vysoké pevnosti a tím i zvýšení bezpečnosti přilby. [3]

2.2 Rozložení materiálů na testované přilbě

Součástí námi testovaného modelu přilby je EPS polystyren s vysokou hustotou, na kterém se nachází přitavený plast ABS technologií In-Mold. Tyto dva základní materiály jsou doplněny o 14 výztuh z uhlíkových vláken, které se nachází převážně v oblastech nejvyššího rizika prasknutí přilby následkem pádu cyklisty z kola, případně střetu s jiným předmětem. Konkrétně se tedy jedná o čelní oblast a taktéž vrchní části přilby.

Již zmiňovaná technologie In-Mold umožňuje vyrábět lehčí přilby s větším množstvím větracích otvorů, aniž by došlo ke snížení nároků na bezpečnost. V našem případě se na geometrii přilby nachází 26 ventilačních otvorů. Celková váha přilby je pak 265 g včetně upevňovacích systémů.



Obr. 2.1 – Schéma rozložení materiálů na testované přilbě

Technologie zpracování přileb

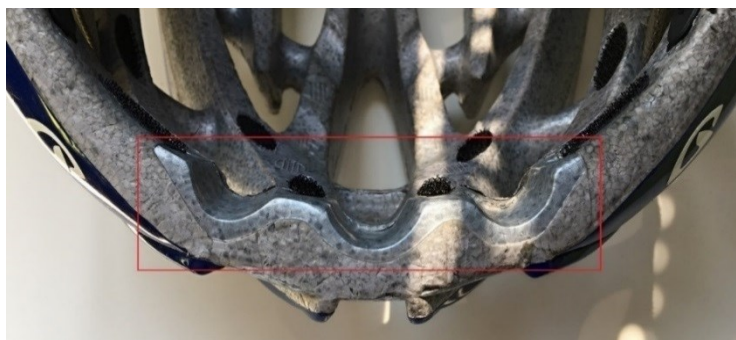
V dnešní době jsou při výrobě cyklistických přileb využívány především technologie In-Mold a Double In-Mold. V obou případech se jedná o vstřikování materiálu do formy. Dalším, ne však tak běžným a zároveň kvalitním způsobem, je lepení skořepina přímo na polystyren EPS.

3.1 In-Mold

V případě této technologie je vložena tenká vrstva plastu, která tvoří skořepinu přilby na dno formy. Následně se forma vysype kuličkami polystyrenu EPS o velikosti přibližně 1 mm. Jakmile je forma vyplněna plastem a naplněna kuličkami polystyrenu, dochází k jejímu utěsnění víkem a následnému vstřikování páry pod velkým tlakem dovnitř formy. Vstřikovaná pára na základě tepla a tlaku zajistí expanzi polystyrenových kuliček, které se následně vytvarují do požadovaného tvaru podle geometrie formy. Plastová skořepina na dně formy následkem zahřátí vstřikované páry přilne pevným a přesným spojením k EPS pění, aniž by vznikly mezi těmito materiály jakékoliv mezery. Výrobce může následně zvýšit kvalitu mechanických vlastností přilby přidáním nylonu, plastu, kovu, popřípadě uhlíkových vláken přímo do formy před vstřikováním páry. Výsledkem je pak vyšší pevnost přilby, popřípadě tenčí a zároveň i lehčí konstrukce.

3.2 Double In-Mold

Tato technologie je pouze variací předešlé In-Mold technologie, kdy je plastová skořepina přidána jak z vnějšku, tak i z vnitřní strany přilby, což má za následek vyšší pevnost, avšak výrobní proces se stává složitější, a tudíž s touto technologií stoupá i cena přilby. Občas je tato technologie použita pouze v oblastech s předpokladem zvýšeného nebezpečí nárazu. Nejčastěji se jedná o čelní oblast, popřípadě oblast chránící temeno nositele přilby. [4]



Obr. 3.1 – Double In-Mold technologie v čelní oblasti přilby

Kapitola 4

Tvorba geometrie výpočtového modelu 3D skenováním

Metoda 3D skenování umožňuje zhotovení geometricky složitých 3D modelů, a to s velmi vysokou přesností, aniž bychom předem znali jejich přesnou geometrii. Můžeme tedy říct, že slouží k digitalizaci různých 3D objektů, které se promítnou v počítači. Nadále je možné provádět úpravu digitalizovaného modelu pomocí nejrůznějších programů. Takto digitalizované modely jsou nejčastěji využity pro reverzní inženýrství, kontrolu kvality, 3D tisk, popřípadě jako podklad pro další modelování designu.

Reverzní inženýrství je označení pro metodu procesu s opačným průběhem oproti klasickému inženýrskému procesu. Cílem této metody je získat z měřeného fyzického tělesa digitální model, jehož geometrie je promítnuta v CAD systémech.

3D skenování dělíme na kontaktní a bezkontaktní. Při výběru způsobu skenování přihlížíme zejména na skenovaný objekt a na požadovanou přesnost, kterou od skenování očekáváme. Stejně tak jako dělíme způsoby skenování tak i měřicí přístroje dělíme do dvou hlavních skupin na kontaktní neboli mechanické a bezkontaktní, které se dále dělí na optické a laserové.

4.1 Rozdělení skenerů

4.1.1 Dotykové skenery

Slouží především pro kontrolu, popřípadě zachycení geometrických prvků za předpokladu bodového kontaktu. Oproti optickým metodám skener nezachycuje celou součást, ale pouze určená místa.

4.1.2 Laserové skenery

Používají se pro komplexní kontrolu s možností snímat celý objekt. Jedná se o nejpreciznější variantu 3D skenování.

4.1.3 Optické skenování

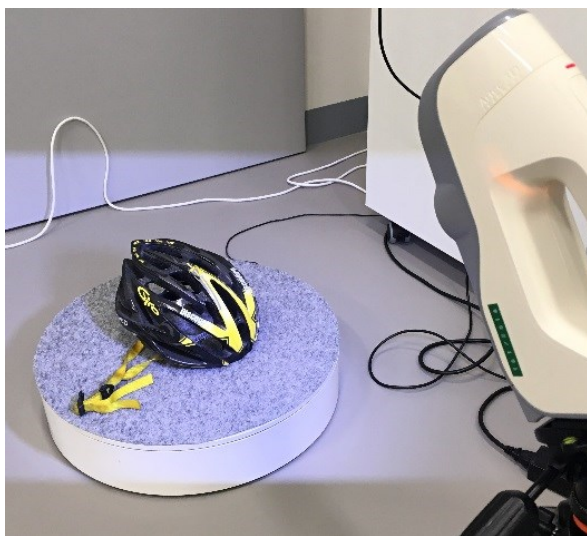
Nabízí nejrychlejší způsob skenování, díky němuž je možné získat i texturu skenovaného objektu. Nevýhodou je však menší přesnost oproti laserové metodě. [5]

4.2 Skenování pomocí Artec Eva

Pro získání digitalizovaného modelu přilby byl použit ruční optický bezdotykový 3D skener Artec Eva, který je vhodný pro rychlou tvorbu textur a 3D modelů středně velkých objektů. Tento skener je nejčastěji zastoupen v automobilovém průmyslu či zdravotnictví. Ve zdravotnictví přispívá ke vzniku realistických náhrad končetin neboli protéz.

Před samotným skenováním byla přilba uložena na otočný systém, jenž umožňoval skeneru zachycovat plynule geometrii v rozsahu 360°. Tento způsob skenování se však příliš neosvědčil z důvodu příliš velké složitosti geometrie tvořené 26 ventilačními otvory. Právě složitost geometrie zapříčinila neschopnost skeneru zachytit na snímcích veškeré potřebné záhyby a větrací otvory přilby. Z tohoto důvodu byl skener odebrán ze stativu a následně bylo skenování zahájeno znovu. Nový pokus skenování byl zahájen již pomocí klasického způsobu ručního skenování. Plynulým otáčením skeneru okolo skenované přilby ve vzdálenosti přibližně půl metru byly dosaženy dostatečně kvalitní snímky potřebné pro vznik přesné geometrie modelu přilby.

Samotné skenování bylo provedeno na dvou totožných přilbách značky Giro modelové řady Atmos. Nejprve byla skenována černá varianta přilby, avšak kvůli velkému množství černé barvy nebyly výsledky uspokojivé. Z tohoto důvodu byla pro druhý pokus již ručního skenování zvolena světlá, modro bílá varianta přilby.

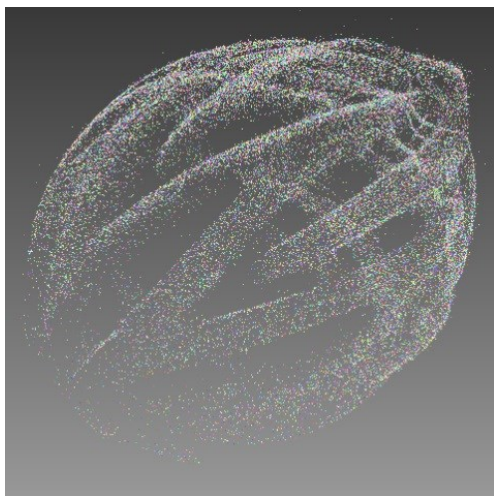


Obr. 4.1 – Skenování pomocí Artec Eva

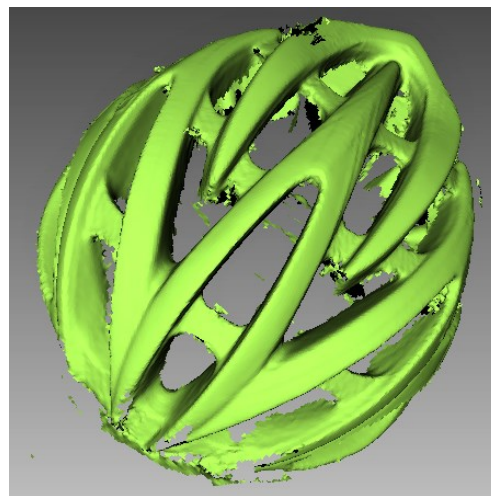


Obr. 4.2 – 3D Skener Artec Eva [6]

Díky správně zvolenému způsobu skenování a také vhodné volbě skenovaného modelu přilby, vznikl velmi přesný grafický model, který se nám zobrazoval v programu Artec Studio 10. Tento program pracuje na principu zachycování tisíců snímků odeslaných skenerem, které následně skládá dohromady.



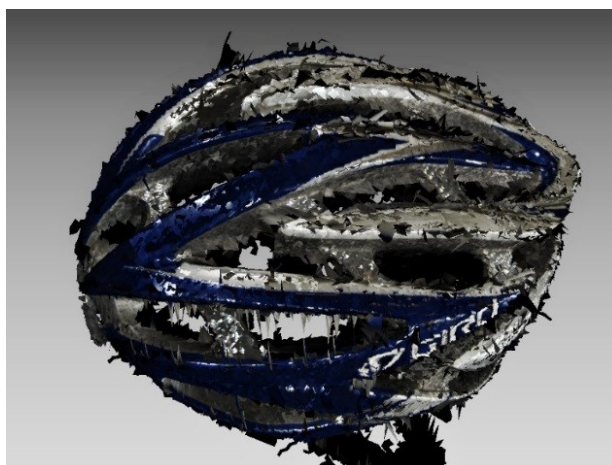
Obr. 4.3 – Sít' helmy



Obr. 4.4 – Naskenované plochy

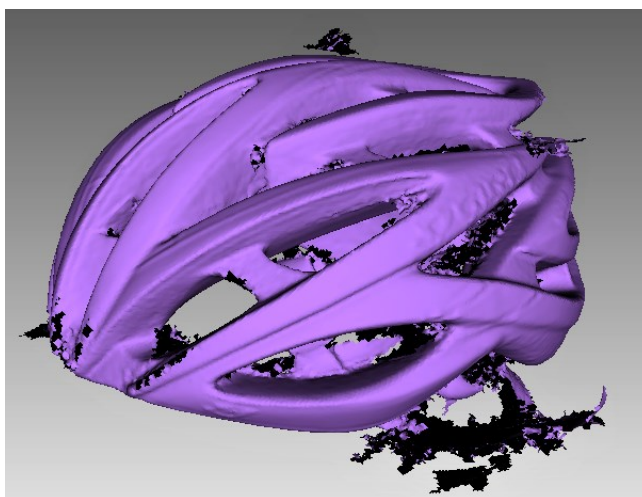
Na obrázcích 4.3 a 4.4 je jasně vidět, že v určitých oblastech přilby došlo k nezachycení geometrie. Tato místa se vyznačují převážně černými, popřípadě chybějícími místy v modelu přilby, jak je možné vidět na obrázku 4.4, popřípadě sítí bodů s nízkou hustotou převážně v čelní oblasti přilby na obrázku 4.3. Tato chybějící místa je možné zpětně doskenovat. Program je tedy schopný poskládat několik sad pořízených snímků, které ve výsledku zkompletuje do nám požadované podoby.

Poté co byla helma naskenována ze všech potřebných stran, jak z vnější, tak i z vnitřní, bylo možné přistoupit k již zmiňovanému zkompletování a spojení všech snímků. Na obrázku 4.5 je tedy možné, vidět grafický model přilby obsahující veškeré pořízené snímky skenerem Artec Eva. Snímky se navzájem překrývají, díky čemuž vznikne přesný geometrický model přilby pouze s malými nedostatky, které na závěr budou odstraněny v grafických softwarech.



Obr. 4.5 – Spojení snímků

Ve výsledku byl tedy získán přesný model, avšak prozatím pouze v surovém neopracovaném tvaru. Model označujeme jako neopracovaný z důvodu stále nevymizelých černých míst, jenž označují chybějící geometrii, která se nepovedla zachytit ani po opakovaném skenování. Tyto plochy bude nutné dotvořit ručně v programu ZBrush 4R7. Zároveň zde budou odebrány řemínky, které se nepovedly naskenovat a jsou vyobrazeny shlukem černých skvrn ve spodní části obrázku 4.6. Řemínky by však i v případě zdařilého naskenování byly odebrány, jelikož jsou pro náš numerický model nepotřebné.



Obr. 4.6 – Výsledný model skenování

Veškeré nerovnosti a nesrovnalosti na povrchu byly tedy odstraněny v grafickém programu ZBrush 4R7, který slouží k vyhlazování geometrie naskenovaných těles. Posledním krokem k získání výsledného modelu přilby bylo renderování v programu KeyShot 5.



Obr. 4.7 – Finální veze modelu přilby po doladění geometrie

Naprosto stejný postup byl použit i při tvorbě modelu skenované hlavy autora práce. Při skenování hlavy bylo nutné mít přes vlasy návlek, aby byla geometrie povrchu hlavy, pokud možno co nejhladší. Tento faktor je důležitý zejména v případě, že budeme počítat náraz přilby na zvolenou plochu a následné promítnutí zbytkového nárazu na lebku, na které budeme zkoumat její případné poškození. Tímto výpočtem se autor plánuje zabývat až v navazující diplomové práci z důvodu náročnosti dynamických simulací.

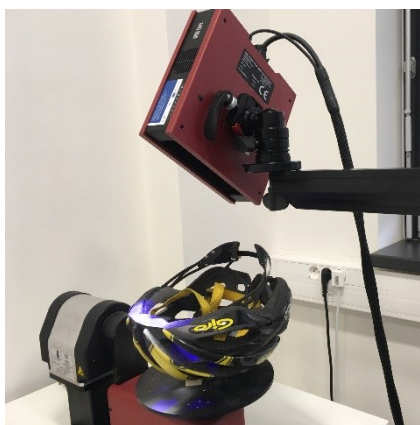


Obr. 4.8 – Sken hlavy s vycentrovanou přilbou

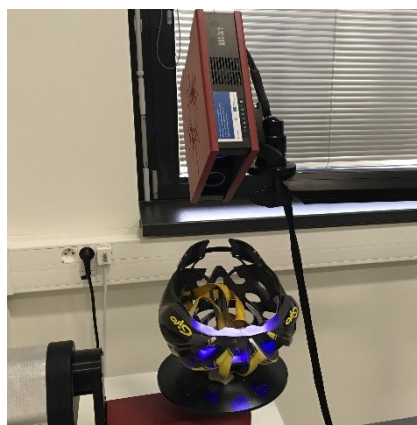
4.3 Skenování pomocí Atos Core

Jak již bylo dříve zmíněno, byly skenovány dvě stejné přilby. Musíme však dodat, že první skenovaná přilba v tmavé barevné kombinaci byla v přední části porušená, a to vlivem nárazu. Takto poškozená přilba byla podrobena dodatečnému skenování v místě s nacházející se prasklinou. Pro tento typ skenování byl použit přesnější skener ATOS Core od firmy GOM, jenž je schopen zachytit i ty nejmenší detaily.

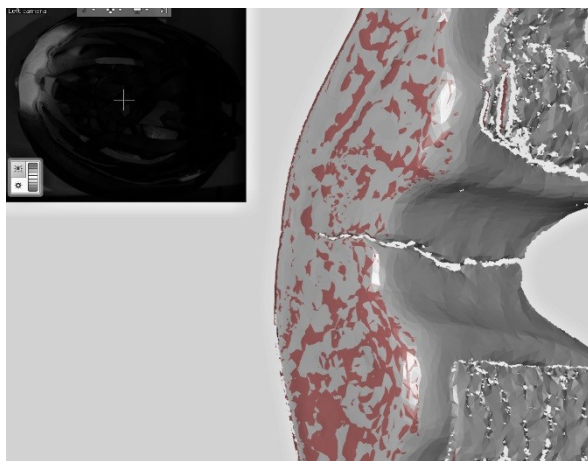
Pro lepší viditelnost praskliny byla přilba v místě porušení nastříkána reflexním sprejem bílé barvy. Díky nanesení bílé vrstvy reflexního spreje byl skener schopen lépe zaostřit a získat tak přesný 3D obraz praskliny. Obraz se nám zobrazoval opět v počítači, a to pomocí skenovacího programu Atos Professional. Naskenovaná data praskliny byla následně sloučena s původní geometrií modelu přilby. Model s prasklinou v přední části přilby budeme moci dále využít při dynamické pádové zkoušce společně s modelem skenované hlavy.



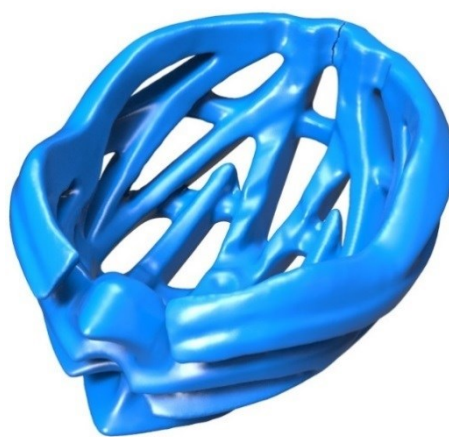
Obr. 4.9 – Skenování praskliny pomocí Atos Core



Obr. 4.10 – Skenování praskliny pomocí Atos Core



Obr. 4.11 – Prasklina zachycená v Atos Professional



Obr. 4.12 – Sloučení praskliny a výsledného modelu

4.4 Výstupní data 3D skenerů

U každého 3D skeneru máme možnost definovat formát, do kterého bude snímaná geometrie exportována. Jednotlivé druhy výstupních dat jsou zásadní pro další zpracování v grafických či výpočetních softwarech. Konkrétně bude popsána přípona STL, jelikož byla použita jako výstupní hodnota v případě našeho skenování cyklistické přilby.

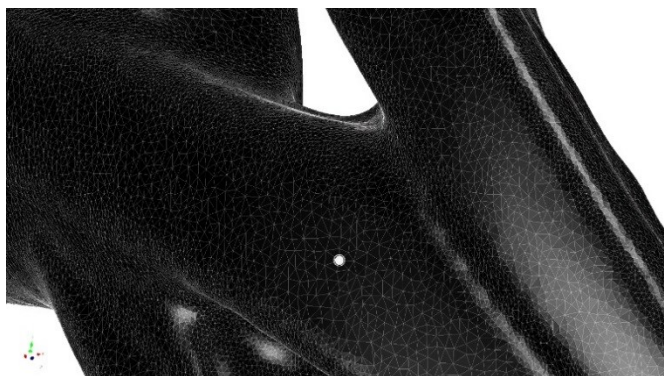
4.4.1 Přípona *.STL (STereoLithography)

Výstupní data jsou ve formě trojúhelníkové sítě, jenž tvoří povrch digitalizovaného modelu s velkou přesností. Nevýhodou tohoto formátu je fakt, že většina softwarů dokáže formát vnímat pouze jako grafiku. Zároveň se však jedná o nejjednodušší způsob vyjádření 3D modelu. [5]

4.4.2 STL geometrie modelu přilby získaná skenováním



Obr. 4.13 – STL geometrie cyklistické přilby



Obr. 4.14 – Detail trojúhelníkové STL sítě

Normy

5.1 ČSN EN 960

Jedná se o evropskou normu, která udává rozměry a konstrukční provedení maket hlavy sloužících pro zkoušení ochranných přileb. Maketou hlavy myslíme trojrozměrnou aproximaci části, popřípadě celé lidské hlavy. Maketa by správně neměla obsahovat lidské rysy ani ušní boltce. Tvary maket hlavy dělíme na tři různé typy:

- 1) Celková maketa hlavy – Tato maketa aproximuje lidskou hlavu od temene dolů pod bradu a její součástí je i část krku.
- 2) Tříčtvrteční maketa hlavy – I tato maketa sahá od temene dolů až po základní rovinu, jenž prochází spodními okraji očních jamek a zároveň horní úrovní vnějších vyústění zvukovodů.
- 3) Poloviční maketa hlavy – Taktéž sahá od temene dolů, avšak na rozdíl od tříčtvrteční makety hlavy nesahá pod základní rovinu, nýbrž je v její úrovni.

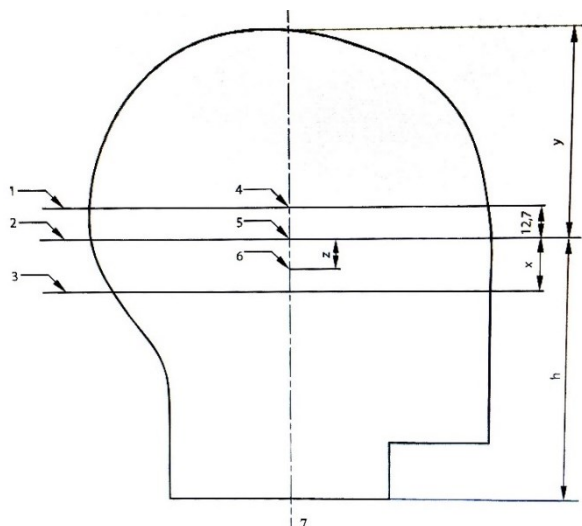
5.1.1 Stanovení geometrie maket hlavy

Velikost makety hlavy udává její obvod, jenž uvádíme v jednotce délky mm. Jednotlivé velikosti jsou uvedeny v tabulce 5.1.

Makety sloužící pro stanovení geometrie neboli jejich rozměrů, popřípadě sloužící pro vyznačení polohy přilby, musí mít vyznačenou:

- Velikost makety hlavy
- Vzatažnou rovinu
- Základní rovinu
- Vertikální podélnou rovinu
- Vertikální příčnou rovinu

Ostatní makety hlavy s jiným využitím musí obsahovat minimálně označení velikosti makety hlavy. [7]



Obr. 5.1 – Řez vertikální rovinou [7]

Legenda:

- | | |
|--------------------|----------------------------|
| 1) Rovina AA' | 5) Bod R |
| 2) Vztažná rovina | 6) Bod G |
| 3) Základní rovina | 7) Vertikální středová osa |
| 4) Bod A | |

Vysvětlení jednotlivých pojmů:

- 1) Rovina AA' je horizontální příčná rovina makety hlavy rovnoběžná se vztažnou rovinou ve vzdálenosti 12,7 cm nad ní. Tato rovina je v úrovni spodního okraje přidržovacího pásu přilby. Podle této roviny můžeme dále stanovit velikostní označení přilby.
- 2) Vztažná rovina je vodorovná rovina ve svislé vzdálenosti y od středu temena hlavy ve vzpřímené poloze. Vztahujeme k ní veškeré kótování vodorovných rovin.
- 3) Základní rovina je vodorovná rovina ve vzdálenosti x od vztažné roviny, se kterou je zároveň rovnoběžná.
- 4) Bod A je těžištěm tříčtvrteční makety hlavy a je umístěn na vertikální středové ose ve vzdálenosti 12,7 mm nad vztažnou rovinou dané makety.
- 5) Bod R se nazývá geometrický centrální bod, který je umístěn na vertikální středové ose v místě průsečíku se vztažnou rovinou.
- 6) Bod G neboli těžiště celkové makety hlavy je umístěn na vertikální středové ose ve vzdálenosti z pod vztažnou rovinou makety hlavy.
- 7) Vertikální středová osa je svislou osou ležící podél vertikální podélné a vertikální příčné roviny.
- 8) Temeno neboli vrchol je oblast na vrchu vnějšího povrchu makety hlavy. [7]

Tabulka 5.1 - Rozměry a hmotnosti maket hlavy vztahující se k obrázku 5.1 [7]

Označení velikosti	h (mm)	x (mm)	y (mm)	z (mm)	Hmotnost (g)
445	108,5	21,0	81,7	9,9	
455	110,6	21,5	83,3	10,1	1970 ± 75
465	112,7	22,0	84,8	10,4	
475	114,8	22,5	86,4	10,6	
485	116,9	23,0	88,0	10,8	
495	119,0	23,5	89,7	11,1	3100 ± 100
505	121,1	24,0	91,2	11,3	
515	123,2	24,5	92,7	11,5	
525	125,3	25,0	94,5	11,7	
535	127,4	25,5	96,0	11,9	4100 ± 120
545	129,5	26,0	97,5	12,1	
555	131,6	26,5	99,1	12,3	
565	133,7	27,0	100,8	12,5	
575	135,8	27,5	102,4	12,7	4700 ± 140
585	137,9	28,0	103,9	12,9	
595	140,0	28,5	105,4	13,1	
605	142,1	29,0	107,2	13,3	5600 ± 160
615	144,2	29,5	108,7	13,5	
625	146,3	30,0	110,2	13,7	6100 ± 180
635	148,4	30,5	111,8	13,9	
645	150,5	31,0	113,5	14,1	

5.1.2 Materiály a všeobecné vlastnosti

Makety hlavy určené pro zkoušení ochranných přileb proti nárazu, odolnosti proti úderu ostrým předmětem a pádu z výšky musí být zhotoveny z pevného kovového materiálu (popřípadě dřeva) jehož rezonanční kmitočet nesmí být nižší než 2000 Hz. Makety hlavy určené pro geometrické (rozměrové) stanovení nebo vyznačení polohy přilby, nemusí tyto vlastnosti splňovat. Mohou tedy být zhotoveny z libovolného materiálu.

Vnější povrch každé makety musí odpovídat geometrickým bodům z obrázku 5.1. Mezi těmito body musí být povrch zaoblený a hladký.

Makety hlavy musí splňovat tyto vlastnosti:

- Těžiště makety zkoušené hlavy musí být ve vzdálenosti o poloměru 10 mm od bodu *G*, který leží na vertikální středové ose.
- Zařízení, které slouží pro připojení akcelerometru musí být umístěno takovým způsobem, aby citlivé osy akcelerometru procházely maximálně ve vzdálenosti 10 mm od bodu *G*, a to i za předpokladu libovolného úhlu ustavení makety hlavy.
- Vhodné závaží, jeli předepsáno tabulkou. [7]

5.2 ČSN EN 1078+A1

Tato evropská norma stanoví požadavky a zkušební metody na přilby pro cyklisty, uživatele skateboardů a kolečkových bruslí. Přilba nám poskytuje ochranu, která je však závislá na souvisejících okolnostech s úrazem, a proto nošení přilby nemusí být vždy dostatečné. Může se tedy stát, že i přes všechny ochranné prvky, které nám přilba nabízí, dojde při nehodě k úmrtí či trvalé invaliditě.

Hlavním úkolem přilby je ztlumit část nárazové energie, aby zbytková energie, jíž je hlava vystavena, nijak neohrozila nositele přilby. V případě vystavení přilby takovéto energii dojde k poškození konstrukce, a proto každá přilba, která byla nárazu vystavena, musí být vyměněna i v případě, že není vidět žádné poškození.

Nedílnou součástí konstrukce přilby je odvětrání, které však není touto normou nijak definováno. Spadá tedy pouze do povinnosti výrobce poskytnout uživateli dostatečný komfort ve smyslu kvalitního přestupu tepla do okolí.

Posledním důležitým ochranným prvkem, který musí být součástí každé přilby je řemínek, který udržuje přilbu nasazenou na hlavě a brání tak sesmeknutí. Je tedy důležité řemínek správně nastavit, abychom eliminovali nebezpečí úrazu.

požadavky a zkušební metody normy ČSN EN 1078 + A1 jsou stanoveny pro:

- Konstrukci přilby a její zorné pole
- Schopnost ztlumit náraz a chránit tak uživatele
- Veškerý upevňovací systém a podbradní pásek
- Označení a informace

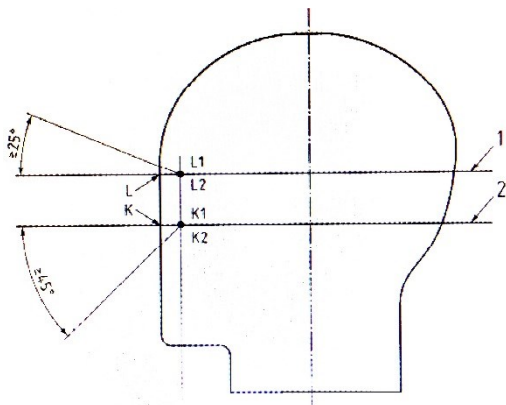
Přilba se běžně skládá ze 3 částí a každá část klade důraz na jiné materiálové vlastnosti. První část přilby je zodpovědná za tlumení nárazové energie. Jedná se tedy o nejdůležitější část přilby konstruovanou především z tvrzené pěny, která je pokryta polykarbonátovou skořepinou. Druhou částí je upínací systém neboli řemínek pod bradou, jenž by měl dosahovat dostatečné pevnosti, aby byl schopný udržet přilbu i v případě nárazu na hlavě. Poslední částí přilby je polstrování neboli výplň přilby poskytující komfort a zároveň kvalitní ustavení hlavy v přilbě. Tento materiál je ve styku s pokožkou, a proto by neměl být vyroben z materiálů, škodlivých pro pokožku a měl by odolávat potu, popřípadě látkám obsažených v kosmetických prostředcích. [8]

Vlastnosti správné konstrukce přilby:

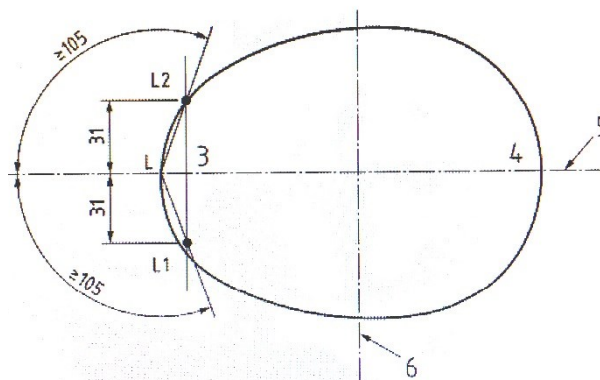
- Nízká hmotnost
- Dostatečné odvětrání
- Snadné nasazování a snímání
- Umožnění nošení brýlí
- Neovlivňuje sluch uživatele
- Neovlivňuje zorné pole

5.2.1 Stanovení zorného pole

norma udává rozsah zorného pole, které nesmí být přilbou omezeno. Ve vodorovném směru je minimální úhel 105° od střední podélné svislé roviny, a to na obě strany. Ve směru nahoru je tento úhel ve velikosti 25° a 45° ve směru dolů od základní roviny.



Obr. 5.2 – Řez maketou hlavy v podélné rovině [8]



Obr. 5.3 – Řez maketou hlavy ve vztažné rovině [8]

Legenda:

- | | |
|--------------------|----------------------------------|
| 1) Vztažná rovina | 4) Zadní strana |
| 2) Základní rovina | 5) Podélná svislá střední rovina |
| 3) Přední strana | 6) Střední příčná svislá rovina |

Podélná svislá střední rovina je obdobou svislé podélné roviny a příčná svislá rovina je tedy obdobou svislé příčné roviny z normy EN 960.

5.2.2 Schopnost tlumení nárazu

Norma ve svém znění popisuje místa lidské hlavy, která musí být přilbou chráněna, jelikož jsou při pádu či nárazu nejvíc náchylná na poškození. Konkrétně se jedná o čelo, týl, boční strany hlavy, spánky a v neposlední řadě temeno hlavy.

5.2.3 Trvanlivost

Přilba splňuje trvanlivost, pakliže po provedených zkouškách nevykazuje žádné ostré hrany, popřípadě jiné deformace, které by mohly nositeli přilby způsobit újmu na zdraví. [8]

5.2.4 Upevňovací systém

Upevňovací systém přilby je normou definován tak, že přilba musí mít k dispozici řemínky, které uživateli přilby udržují přilbu na hlavě a zároveň jsou s přilbou dostatečně pevně spojeny, aby i v případě nárazu nedošlo k jejich odtržení. Žádná část systému nesmí být v zelené barevné kombinaci. Součástí upevňovacího systému je také podbradní pasek, který nesmí být vybaven ochranou brady a jeho šířka nesmí být menší než 15 mm. Ovšem může být vybaven doplňky zvyšující komfort. Poslední nutnou částí upevňovacího systému je součást, díky níž se může délka podbradního pásu seřizovat a udržuje tedy celkové napětí systému. Zároveň musí být možnost přenastavit tuto součástku tak, aby se nedotýkala kosti spodní čelisti.

Upevňovací systém se při zkouškách nesmí dynamicky protáhnout o více než 35 mm a u zbytkového protažení nesmí dojít k natažení většímu než 25 mm. V rámci těchto hodnot uvažujeme do protažení i prokluz upevňovací součásti. Jednou z dalších podmínek úspěšné zkoušky je nesesmeknutí přilby z makety hlavy a po skončení dané zkoušky musí být možné rozepnout upevňovací systém za použití jedné ruky. [8]

5.2.5 Zkoušení maket hlavy

Pro zkoušky musí být vždy použity makety hlavy odpovídající evropské normě ČSN EN 960. Tato norma uvádí přesné velikosti helem, které jsou uvedeny v tabulce 5.1. Jedinou výjimkou je zkouška schopnosti tlumení rázu, u které využíváme pouze velikosti 495, 535, 575, 605 a 625. [8]

Pro zjištění dostatečné pevnosti upevňovacího systému používáme makety hlavy odpovídající taktéž normě ČSN EN 960.

Tabulka 5.2 – Velikosti maket hlavy [8]

Označení velikosti (obdoba ČSN EN 960)	Vnitřní obvod přilby mm
495 (A)	500
515 (C)	520
535 (E)	540
555 (G)	560
575 (J)	570
585 (K)	580
605 (M)	600
625 (O)	620

5.2.6 Postup při zkoušce

Pro každou zkoušku podrobujeme testům 4 přilby pro stejnou velikost makety hlavy. Tyto velikosti maket hlavy musí být v rozsahu velikostí jenž stanovuje výrobce. Nejprve je nutné přilbu důkladně prohlédnout, zdali je vhodná pro daný typ měření. Pokud je přilba vyhovující, pokračujeme stanovením hmotnosti zkoušených přileb stejné velikosti. Následně spočteme střední hodnotu, kterou zaokrouhlíme s přesností na 10 g. [8]

Tabulka 5.3 – Pořadí zkoušky na zkušebních vzorcích [8]

Prováděná zkouška	Pořadí zkoušky	Číslo zkušební vzorku		
Účinnost upevňovacího systému	1.	1	-	-
Schopnost tlumení nárazů	2.	1	2	3
Pevnost upevňovacího systému	3.	-	2	3

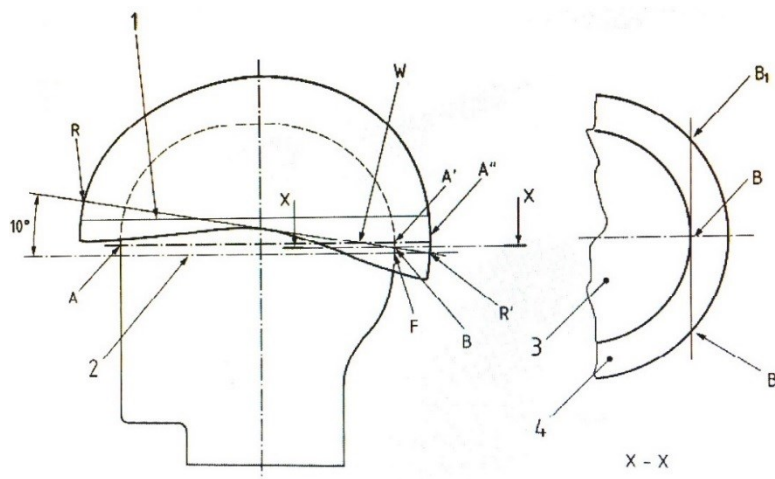
Čtvrtý vzorek ponecháme pro další případná srovnání a uchováme jej pro případ jistých pochyb o schopnosti přilby splnit některý ze stanovených požadavků.

5.2.7 Stanovení schopnosti tlumení nárazu

Pokud chceme stanovit schopnost helmy tlumit náraz, musíme nejprve vyznačit patřičné body na maketě hlavy vyplývající z normy ČSN EN 960. Konkrétně se jedná o bod B , který se nachází přesně mezi body A' a F . Bodem A' jak již bylo uvedeno v normě ČSN EN 960 prochází rovina AA' .

Po vykreslení těchto bodů můžeme zkoušenou přilbu nasadit na maketu hlavy tak, aby splňovala správný rozsah zorného pole. Následně přilbu lehce zatížíme abychom zamezili jejímu sesmeknutí.

Následně začneme s vykreslováním bodů a rovin na zkoušené přilbě. První zakreslenou linií bude AA' náležící rovině AA' následně zakreslíme linii AA'' , která je s předchozí linií rovnoběžná, avšak je od ní odsazena ve směru osy y o 20 mm. Tato linie je pro nás nulovou čarou pro měření úhlu. Následně vyznačíme na vnějším povrchu zkoušené přilby boční vodorovné průměty, které označíme jako $B1$ a $B2$. Těmito body dále prochází linie RR' nakloněná od nulové čáry o 10° směrem nahoru. [8]



Obr. 5.4 – Vymezení zkušební oblasti [8]

Legenda:

1 nulová čára (rovina) pro měření úhlů

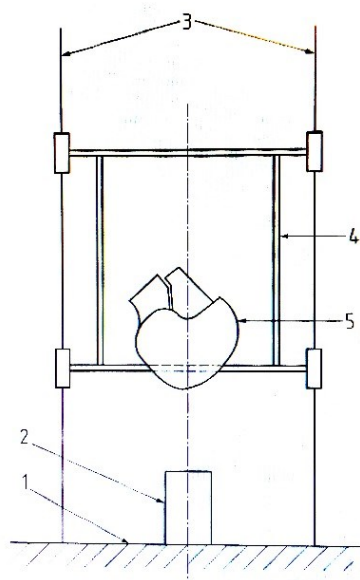
3 maketa hlavy

2 vztažná rovina

4 přilba

5.2.8 Zkušební zařízení

Zkušební zařízení pro určení schopnosti tlumit náraz dle normy ČSN EN 1078 se skládá z nárazové podložky o výšce nejméně 50 mm a délce 125 mm. Podložka má za úkol napodobit obrubník vyrobený z oceli s nárazovou plochou o průměru 130 ± 3 mm. Podložka je pevně spojená se základnou o hmotnosti nejméně 500 kg pro jejíž výrobu se užívá beton, ocel, popřípadě kombinace těchto materiálů. Na základnu je připevněna část stroje sloužící pro vedení při volném pádu. Po tomto vedení se pohybuje pohyblivý nosič s připevněnou přilbou spojenou s kovovou maketou hlavy odpovídající ČSN EN 960, na kterou je dále připevněn tříosý akcelerometr, jehož hmotnost nesmí přesáhnout 50 g a musí být schopen zaznamenat zrychlení do 2000 g. Nosič svou konstrukcí nesmí nijak ovlivňovat měření zrychlení v těžišti makety hlavy a musí umožnit vystředění kteréhokoliv zkoušeného bodu přilby svisle nad středem nárazové podložky. Dále je součástí zkušebního zařízení přístroj měřící rychlost kovové makety hlavy nejvýše 60 mm nad místem nárazu. Hmotnost jednotlivých velikostí maket hlavy je popsána v tabulce 5.1 normy ČSN EN 960. [8]



Legenda:

- 1) základna
- 2) nárazová podložka
- 3) vedení
- 4) pohyblivý nosič
- 5) maketa hlavy s přilbou

Obr. 5.5 – Zkušební zařízení pro stanovení tlumení nárazu [8]

5.2.9 Umělé stárnutí:

Simulace umělého stárnutí se provádí tak, že nejprve vystavujeme povrch zkoušeného vzorku přilby ultrafialovému záření, které je generováno xenonovou výbojkou o výkonu 125 W. Ozařování probíhá 48 hodin a vzdálenost výbojky od zkoušené přilby dosahuje 250 mm. Po ukončení ozařování se přilba začne ostříkovat vodou v rozsahu 4 až 6 hodin. Síla průtoku ostříkující vody je stanovena na 1 l/min. [8]

Experimentální pružnost – Metoda korelace digitálního obrazu

Experimentální metody pružnosti využíváme k získání velikosti poměrných deformací, posuvů a napětí, které však není možno měřit přímo, a proto k určení jeho velikosti potřebujeme posuvy, popřípadě deformace. Poté je již možné, za použití správných vztahů napětí vyhodnotit. [9]

Metoda korelace digitálního obrazu byla využita pro zjištění poměrných deformací, které sloužily pro správné definování materiálů při výpočtech v MKP softwaru.

Tato metoda patří k metodám optickým. U optických metod je hlavní podmínkou viditelnost vyšetřované plochy povrchu a největší výhodou těchto metod je bezkontaktnost. Metoda korelace digitálního obrazu funguje na principu srovnávání intenzity barev jednotlivých pixelů, které jsou zachyceny na sérii po sobě jdoucích snímků zachycujících povrch deformovaného tělesa. Můžeme tedy konstatovat, že se jedná o vyhodnocování změny polohy kontrastních bodů na povrchu geometrie měřeného tělesa. Díky použití matematické operace korelace můžeme stanovit posunutí jednotlivých kontrastních bodů. Korelace udává míru podobnosti dvou entit v našem případě obrazů. Hledání dílčích posuvů v kontrastních bodech je převedeno na hledání maxima korelační funkce. Výpočet Korelační funkce je založen na snímcích zachycujících polohu pixelů před deformací a po deformaci ve stupních šedi. Nejjednodušší způsob pro získání skvrnitého povrchu na geometrii zkoušeného tělesa je nastříkáním barvou.

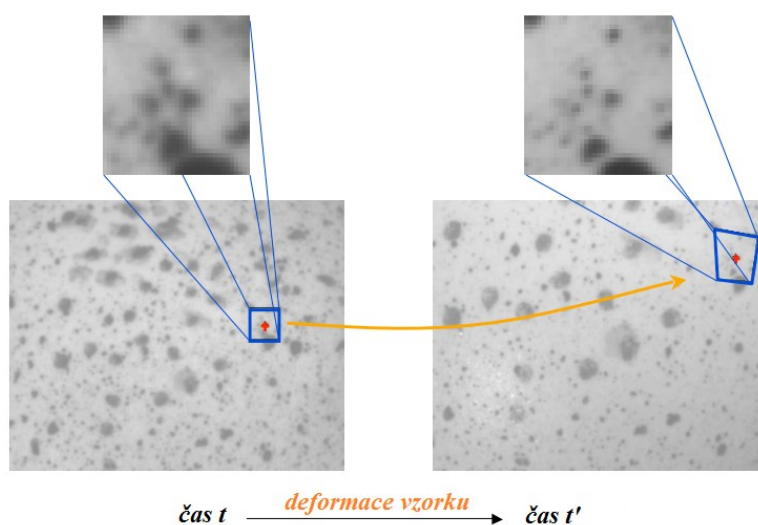
Předpoklady pro DICM:

- Velikost virtuálních pixelů je dána kvalitou rozlišení CCD kamer a rozměrem vyšetřované oblasti.
- Diskrétní funkce popisuje optické vlastnosti jednotlivých pixelů a zároveň určuje jejich stupeň šedi.
- Fasety jsou vymezené množiny pixelů, na nichž se provádějí Korelační analýzy. Jednotlivé fasety obsahují shodné množství pixelů.
- Uvažujeme homogenní pole posuvů ve všech fasetách.
- Diskrétní funkce $f(x, y)$ popisuje stav fasety před změnou tvaru a následně v průběhu přetváření je faseta popisována diskrétní funkcí $g(x', y')$. [10]

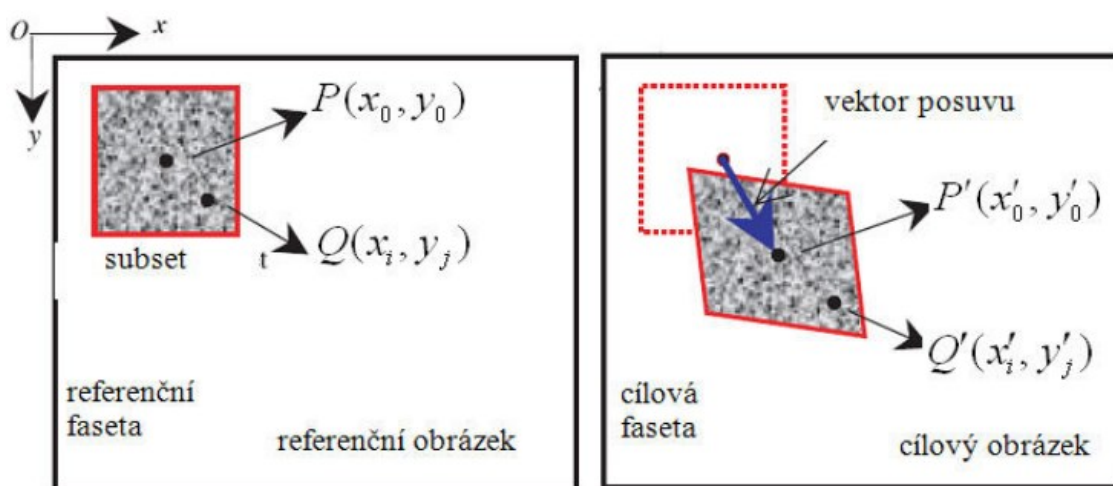
6.1 Přetvoření bodů

Pro lepší představu přetváření polohy bodů použijeme dva 2D snímky Obr. s viditelným skvrnitým vzorem. První snímek zachycuje stav před deformací a druhý po deformaci. Pro oba snímky je stanoven výřez, u něhož sledujeme posuv jednotlivých bodů v osách x a y , které jsou navzájem kolmé.

Změna polohy bodu Q je popsána tvarovými funkcemi, díky nimž je možné popsat souřadnice bodu Q' .



Obr. 6.1 – Posun bodu vlivem deformace [10]



Obr. 6.2 – Přetvoření bodu v rovině [10]

6.2 Postup měření metody korelace digitálního obrazu

Nejprve bylo zapotřebí nastříkat povrch zkoušené přilby pomocí autolaku na bílou barvu a následně použít tmavý odstín laku pro vytvoření bodů na povrchu přilby. Bílá barva byla zvolena pro dobrý kontrast bodů na zkoušeném předmětu. Pomocí tmavých bodů na povrchu přilby bylo možné určit při zkoušce měření pomocí DICM jednotlivé posuvy a deformace.



Obr. 6.3 – Přilba nabarvená na bílou barvu



Obr.6.4 – Přilba s nanesenými body

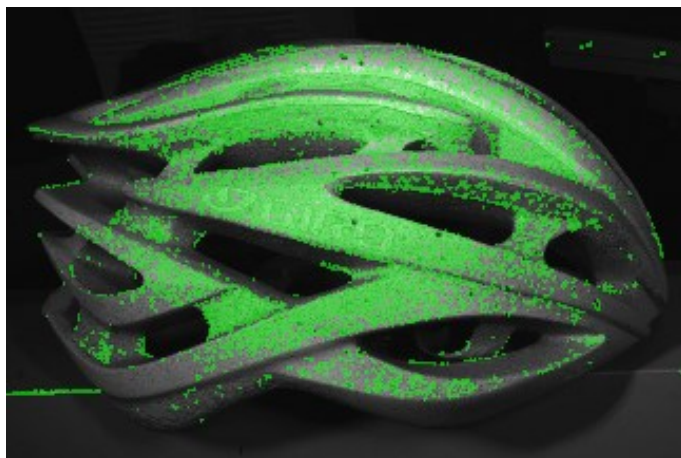
Po nastříkání na bílo a vyznačení kontrastních bodů byla přilba ustavena do testovacího stroje. Jednalo se o Testometric M500 – 50CT což je dvousloupový stolní zkušební stroj ovládaný pomocí počítače. Pomocí tohoto stroje je možné provádět zkoušky v tlaku, ohybu, cyklickém namáhání, adheze, stříhu, tvrdosti a zkoušení pružin. Pro náš experiment byl stroj nastaven na zkoušku v tlaku.

Jelikož bylo cílem experimentu změřit 3D deformace a posuvy zkoušeného tělesa, bylo nutné využít dvě CCD kamery, které se zaostřily na testovaný předmět (v našem případě přilbu) ze dvou různých úhlů. Konkrétně se jednalo o soustavu dvou kamer Mercury RT a dvou reflektorů.



Obr. 6.5 – Testometric M500 – 50CT s ustavenou přilbou zaměřenou kamerami a reflektory

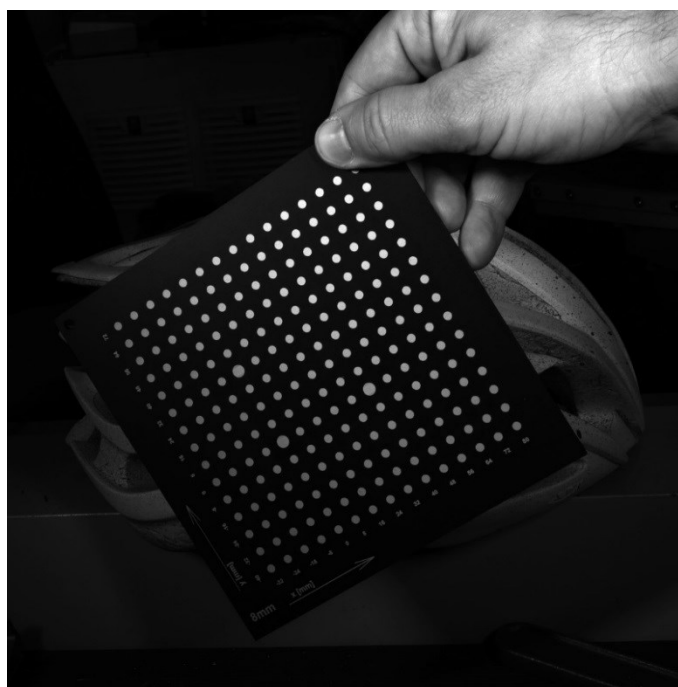
Jakmile byla soustava dvou kamer a reflektorů rozmístěna a přilba správně ustavena v testovacím stroji, bylo možné začít s nastavováním zesílení kamer. Následně bylo provedeno zaostření na černé tečky, které se projevovaly jako zelená mapa na obrazovce počítače.



Obr. 6.6 – Mapa bodů

V dalším kroku byl odstraněn odlesk reflektorů na zkoumaném předmětu pro zkvalitnění měření. Jakmile byl odlesk odstraněn, bylo zapotřebí zachytit na obou kamerách stejné body na vybrané ploše.

Posledním krokem před spuštěním měření byla kalibrace. Kalibrace se provádí zvolením mřížky se správným měřítkem. Pro naše měření byla ideální mřížka s roztečí 8 mm. Zvolená rozteč byla nadefinována do programu načež bylo pohybováno s mřížkou před měřeným objektem. Kamery měřily vzdálenosti mezi jednotlivými body na mřížce a zaznamenávaly snímky, které se automaticky ukládaly do programu. Kalibrační mřížkou bylo nutné natáčet tak dlouho, dokud nebylo dosaženo dostatečného počtu snímků, potřebných ke kalibraci.



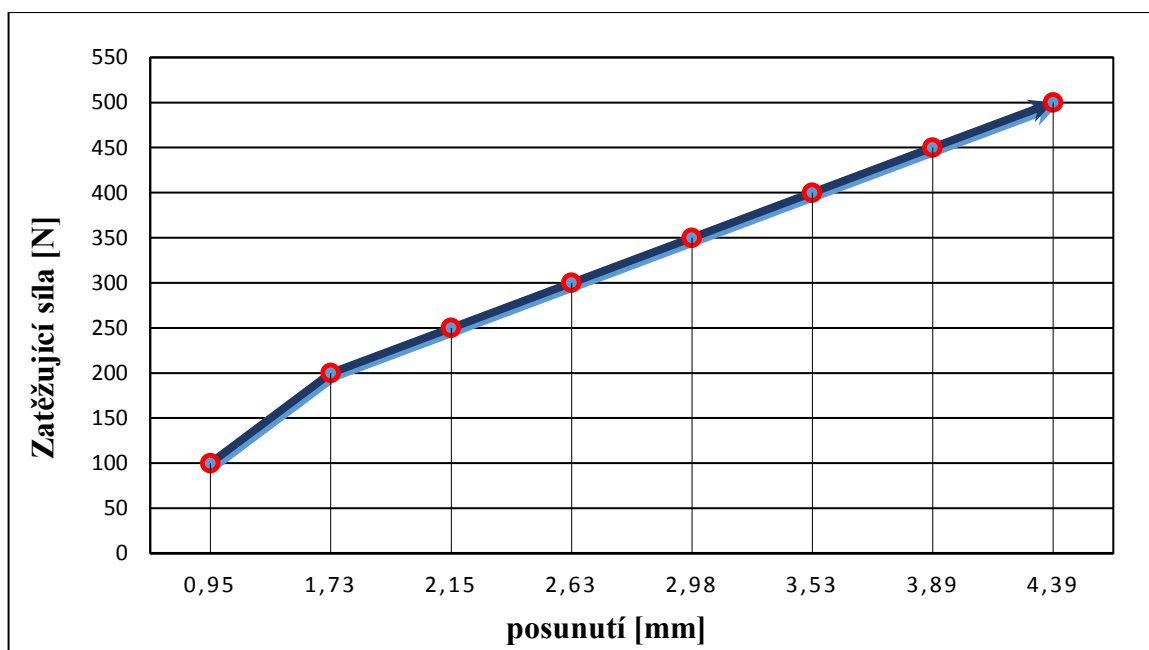
Obr. 6.7 – Kalibrace za pomoci mřížky

Po úspěšném dokončení kalibrace, byla přilba uvedena do kontaktu s testovacím strojem. Následně začalo zatěžování přilby postupně vzrůstající silou a její chování bylo zapisováno do tabulky.

Tabulka 6.1 – Závislost posunutí na zatěžující síle

Síla [N]	Posuv [mm]
100	0,95
200	1,731
250	2,147
300	2,629
350	2,983
400	3,526
450	3,888
500	4,394

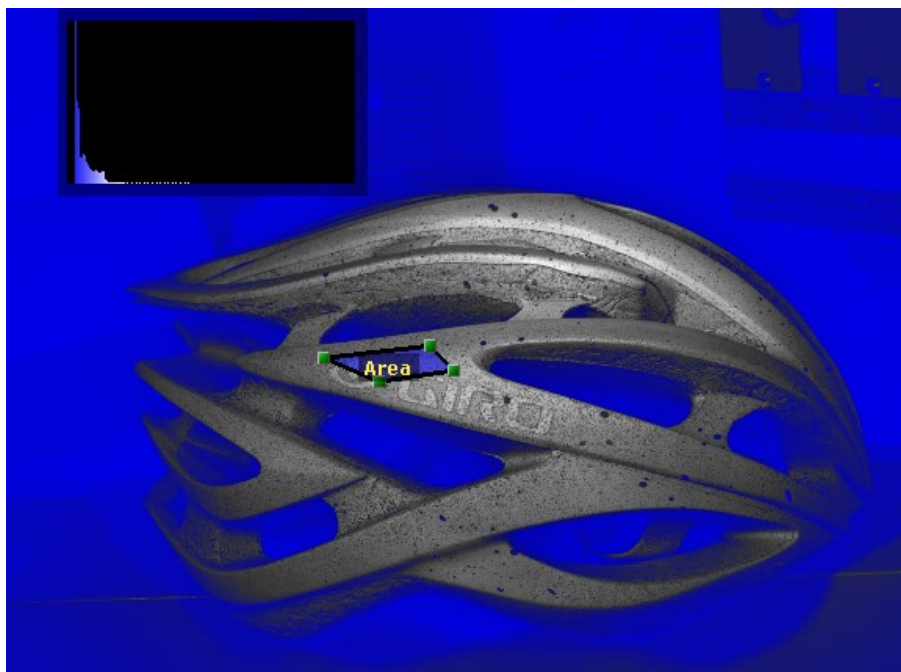
Graf 1 - Závislost zatěžující síly na posunutí:



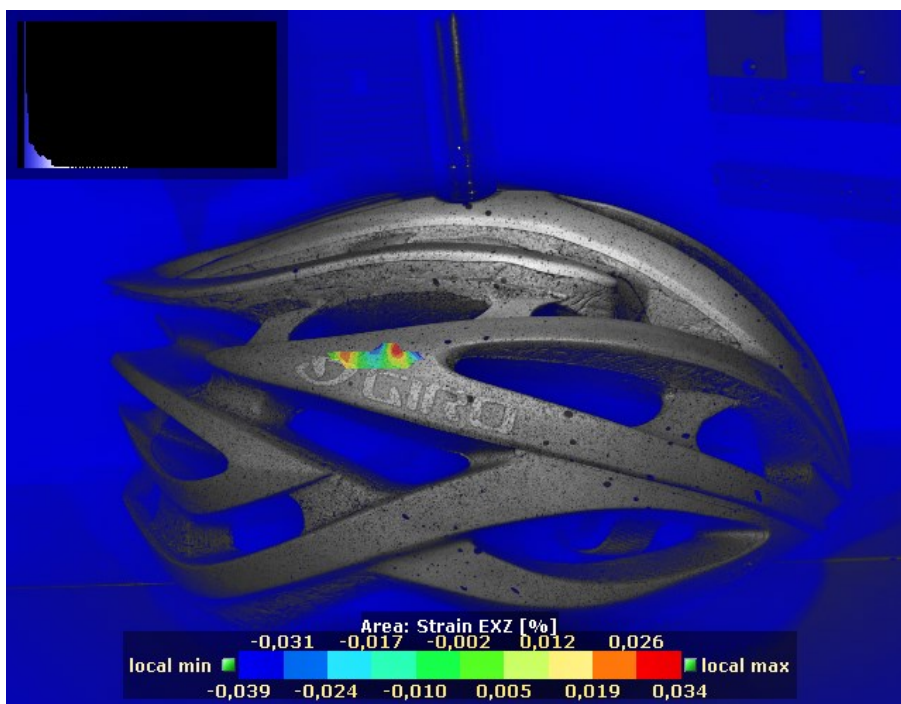
Z grafu můžeme vyčíst, že křivka vzniklá závislostí síly na posunutí je téměř lineární.

6.3 Vlastní realizace měření metodou digitální korelace

Aby bylo možné zjistit deformaci a chování celé přilby, bylo zapotřebí vytvořit na její geometrii malou plochu, na níž byly vyšetřovány hledané veličiny. Plocha byla vytvořena v místě s dobrou viditelností bodů a následně bylo provedeno zatížení. Chování této plochy bylo aplikováno na celou přilbu, z čehož byl získán celkový náhled na deformace vzniklé při experimentu.



Obr. 6.8 – Vyšetřovaná plocha



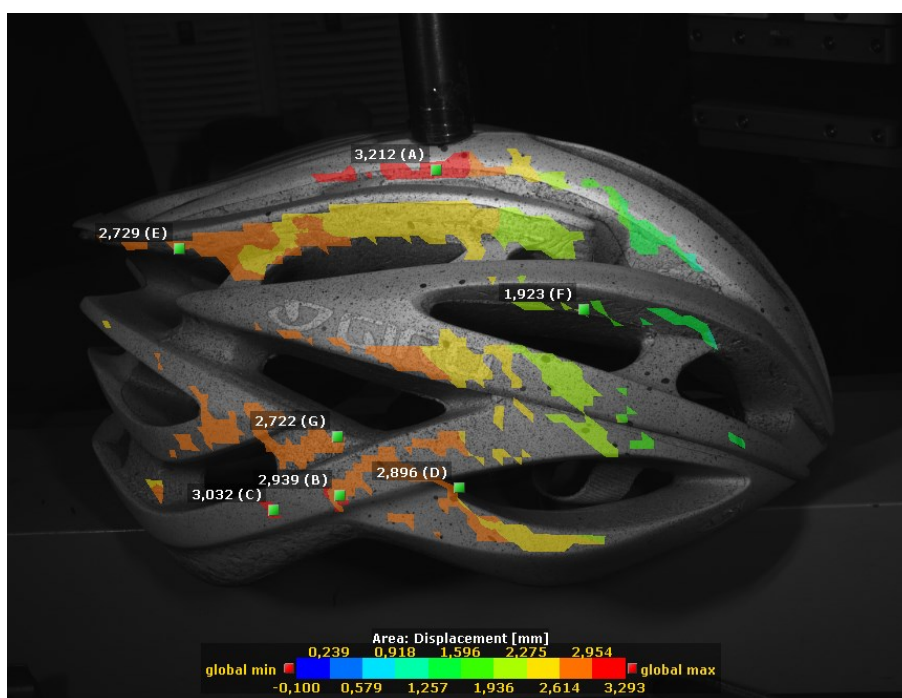
Obr. 6.9 – Vyhodnocení plochy – poměrné deformace ε_{xz}

6.4 Vyhodnocení experimentu

6.5.1 Celkové posunutí

Jakmile bylo zjištěno chování vybrané plochy, bylo možné aplikovat ji na celou geometrii a ve výsledku tak získat celkové posunutí v jednotlivých bodech přilby. Z důvodu nízkého počtu nastříkaných bodů, nebylo možné získat barevnou škálu zobrazující posuv v konkrétním místě na celé ploše helmy. I přes slabou kvalitu vyobrazené mapy bylo možné stanovit největší posuv, ke kterému dochází přímo pod zatěžující silou 500 N od tlačícího válečku. Maximální hodnota posunutí tedy dosahuje velikosti 3,293 mm.

V případě, že bychom chtěli získat přesnější výsledky měření, museli bychom znovu obarvit helmu na bílou barvu a následně provést nové nanesení bodů. Nyní však s větší hustotou a následně celé měření zopakovat.



Obr. 6.10 – Celkové posunutí helmy při zatížení 500 N

Rozdíl velikosti posunutí naměřeného ihned během měření po zatížení silou 500 N, které je zobrazeno v tabulce 6.1 a hodnoty celkového posunutí vyobrazeného na obrázku 6.10 je způsoben otláčením přilby do podpěry v místech jejího dotyku. Celkové posunutí na obrázku 6.10 již s touto deformací nepočítá.

6.5.2 Výsledné deformace

Změřené hodnoty posuvů nám následně určí celkovou poměrnou deformaci přilby ε_1 , ε_2 a ε_3 . Deformace neboli změna tvaru tělesa formulovaná matematickou teorií pružnosti, je popsána vektorovou formou zápisu uvedeného pole posuvů. Maticově popíšeme posuvy touto rovnicí:

$$\{u\} = \begin{Bmatrix} u(x, y, z) \\ v(x, y, z) \\ w(x, y, z) \end{Bmatrix}$$

Pro odvození deformačního stavu tělesa slouží infinitesimální tenzor deformace, který vyjádříme pomocí matice takto:

$$\{\varepsilon\} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \frac{1}{2}\gamma_{xz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{yx} & \varepsilon_y & \frac{1}{2}\gamma_{yz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{zx} & \frac{1}{2}\gamma_{zy} & \varepsilon_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 \end{bmatrix}$$

Tenzorový zápis předchozí rovnice můžeme vyjádřit i takto:

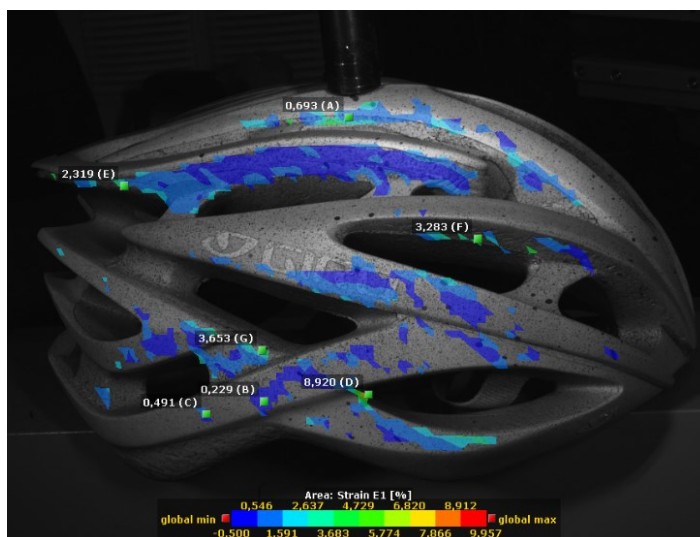
$$\varepsilon_{ij} = (u_{i,j} + u_{j,i})/2$$

Maticový zápis můžeme taktéž přepsat do vektorového:

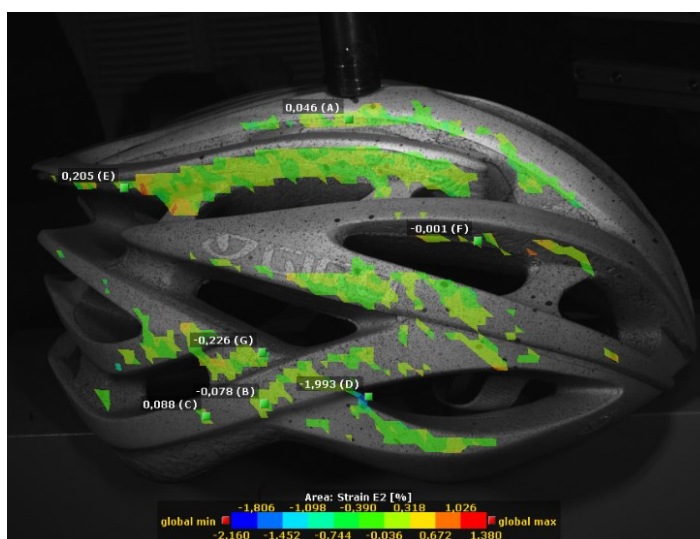
$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}\}^T$$

Vazby mezi jednotlivými složkami posuvů a deformacemi jsou vyjádřeny pomocí geometrických rovnic. Pokud popisujeme deformaci celého tělesa, musíme pro všechny body tělesa popsat polohu i po přetvoření. Pro případ malých přetvoření nazýváme tyto rovnice Cauchyho rovnice: [11]

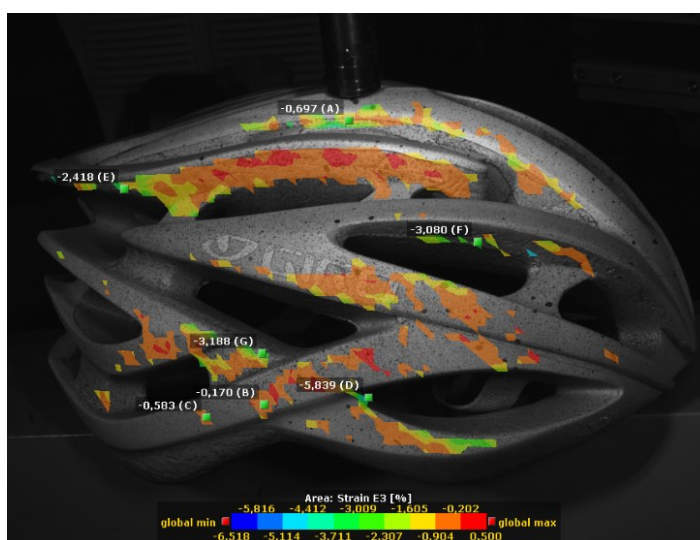
$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} & \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} & \gamma_{xz} &= \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \\ \varepsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z} & \gamma_{yz} &= \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \end{aligned}$$



Obr. 6.11 – Deformace přilby ϵ_1



Obr. 6.12 – Deformace přilby ϵ_2



Obr. 6.13 – Deformace přilby ϵ_3

Výpočet metodou konečných prvků

7.1 Princip MKP

MKP se v praxi využívá na řešení fyzikálních problémů numerickou metodou. Postup správného řešení je tedy následovný:

- 1) Rozbití řešené oblasti na menší podoblasti nazývané elementy neboli prvky
- 2) Zjištění chování jednoho elementu, které popíšeme pomocí matematických rovnic
- 3) Složení elementů zpět a následný popis celé soustavy pomocí rovnice
- 4) Definování okrajových podmínek
- 5) Vyřešení primárních proměnných v podobě posuvů z rovnic soustavy při aplikaci okrajových podmínek
- 6) Dopočítání sekundárních veličin jako např. deformace a napětí, které jsou odvozené z primárních proměnných [11]

MKP se dále dělí podle způsobu řešení úloh na metodu deformační a silovou. Deformační metoda řeší úlohu, při níž primární proměnnou jsou posuvy naopak silová varianta MKP má ve výsledku za primární proměnnou napětí. V praxi se však téměř vždy setkáváme se softwary pracujícími na principu deformační metody.

- Deformační metoda:

$$u \rightarrow \varepsilon \rightarrow \sigma$$

- Silová metoda:

$$\sigma \rightarrow \varepsilon \rightarrow u$$

Základní rovnice MKP:

$$[K] \cdot \{\Delta\} = \{F\}$$

$\{\Delta\}$ – vektor zobecněných posuvů; $[K]$ – globální matice tuhosti;
 $\{F\}$ – celkový vektor zobecněných uzlových sil [12]

7.2 Zvolené materiály

Dle získaných poznatků o technologiích výroby přileb a při ní používaných materiálů byly pro výpočet zvoleny 3 druhy materiálů jejichž vlastnosti a specifikace byly vkládány do programu Ansys Workbench 18.0, který pracuje na bázi deformační metody. Tento program byl tedy naší volbou pro získání a řešení numerického modelu.

Pro polystyrenovou pěnu byl použit Expandovaný polystyrén. Tímto materiálem byl vyplněn celý STL objem, jenž byl výsledkem 3D skenování. Na něj se následně nanášely další dva materiály, a to akrylonitril – butadien – styren, ze kterého byla tvořena skořepina a také uhlíková vlákna, která sloužila pro vytvoření povrchových výztuh. Pro skořepinu i výztuhy byla změřena tloušťka materiálu o velikosti 0,2 mm.

Správné naladění mechanických vlastností jednotlivých materiálů přilby je zásadní pro získání relevantních výsledků v dalších numerických simulacích. Ladění probíhalo postupnou změnou materiálových parametrů, provedením výpočtu a srovnáním výsledků s provedeným experimentem pomocí korelace digitálního obrazu. Základním faktorem bylo správné stanovení modulu pružnosti E u Expandovaného polystyrenu použitého pro pěnovou část helmy, jenž nejvíce ovlivňoval výsledné posunutí numerického výpočtu. Výsledné mechanické parametry jsou uvedeny v tab. 7.1–7.3 a lze konstatovat dobrou shodu s údaji nalezenými v literatuře: [1], [2], [13], [14] a [15].

Tabulka 7.1 – Materiál pěny

Expandovaný polystyren (EPS)	
Hustota	101 kg/m^3
Modul pružnosti E	59 MPa
Poissonovo číslo	0,2

Tabulka 7.2 – Materiál skořepiny

Skořepina – akrylonitril – butadien – styren (ABS)	
Hustota	1045 kg/m^3
Modul pružnosti E	3000 MPa
Poissonovo číslo	0,4

Tabulka 7.3 – Materiál výztuh

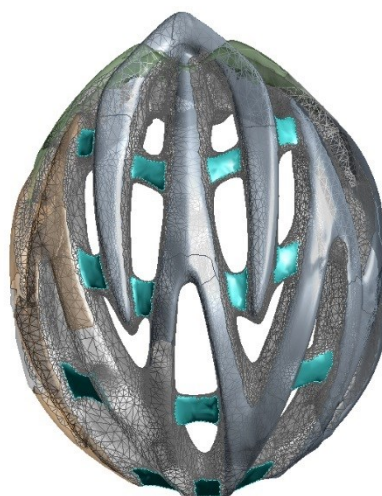
Uhlíkové vlákna	
Hustota	1780 kg/m^3
Modul pružnosti E	$181\,000 \text{ MPa}$
Poissonovo číslo	0,3

7.3 Tvorba geometrie

Prvním krokem ke korektnímu výpočtu, bylo vytvoření jednotlivých ploch na povrchu získaného objemu přilby, které budou představovat skořepinu a také výztuhy. K vytvoření takovýchto ploch nám měla posloužit vytvořená trojúhelníková STL síť, získaná díky 3D skenování. Tato síť však byla příliš hustá a bylo by tedy velmi obtížné sloučit její jednotlivé plochy. Z tohoto důvodu byla snížena hustota sítě pomocí softwaru 3 Matic. Díky tomuto snížení hustoty sítě byly jednotlivé plošky ve velikosti 3 mm, což postačovalo k tomu, abychom mohli začít s jejich spojováním. Pro spojení těchto ploch bylo využito funkce merge faces, jež je obsažena v prostředí SpaceClaim. Nejprve byla vytvořena plocha vyznačující skořepinu z plastu ABS a poté 14 malých plošek patřících výztuhám z uhlíkových vláken.

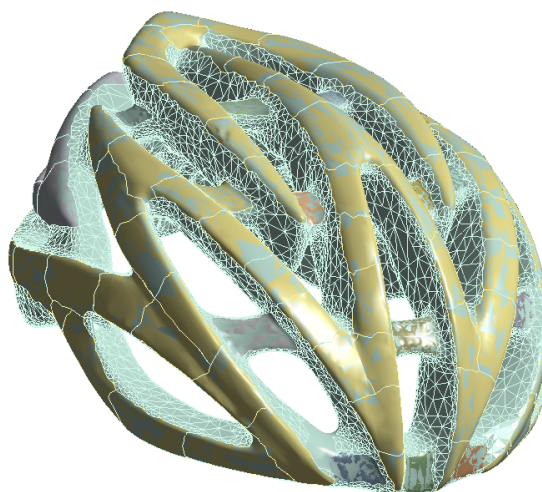


Obr. 7.1 – Vytvořená plocha pro skořepinu



Obr. 7.2 – 14 malých plošek pro výztuhy

Jakmile jsou všechny potřebné plochy vytvořeny, použijeme funkci surfaces from faces pro vytvoření jednolitých povrchů z plastu a také uhlíkových vláken, kterým budou následně přiřazeny materiály a tloušťka.



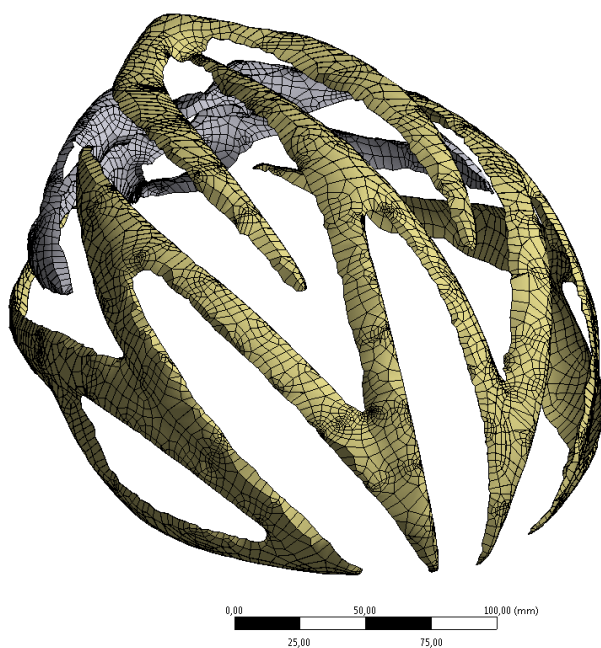
Obr. 7.3– Vytvoření povrchů funkcí surfaces from faces

7.4 Tvorba konečnoprvkové sítě

Jelikož přilba po prvotním síťování obsahovala příliš velké množství konečných prvků, byly následně užity v dalším síťování konečnoprvkové elementy o velikosti 3 mm. Touto velikostí elementů byly postupně vysítovány veškeré části přilby. Pro vysítování objemu byly použity trojrozměrné jehlanové elementy na rozdíl od povrchů skořepiny a výztuh, kde byly použity dvourozměrné čtyřúhelníkové skořepinové prvky. Ve výsledku bylo po vysítování získáno 827 839 uzlů a 543 212 elementů.



Obr. 7.4 – Vysítovaný objem pěny EPS



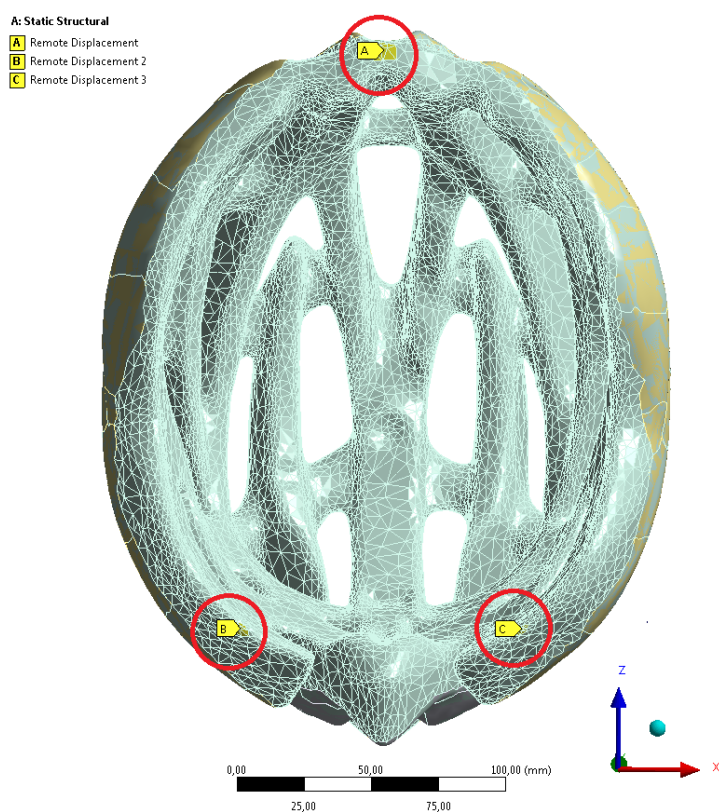
Obr. 7.5 – Vysítovaná skořepina



Obr. 7.6 – Vysítované výztuhy

7.5 Aplikace okrajových podmínek

Při tvorbě okrajových podmínek bylo hlavním cílem nakonfigurovat je tak, aby co nejpřesněji kopírovaly ustavení a následné zatížení přilby v předešlém experimentu metody korelace digitálního obrazu. Stejně jako u experimentu byla tedy přilba podepřena ve 3 bodech označených jako *A*, *B* a *C* (body v červeném kroužku). Tato místa byla odečtena z otláčení přilby následkem experimentu. Pro vytvoření těchto tří okrajových podmínek byla použita funkce Remote Displacement, která byla aplikována na vybrané plošky. Následně funkce dopočte těžiště vybraných ploch a v tomto místě vytvoří řídicí uzel, ve kterém je následně předepsána zvolená okrajová podmínka. Propojení řídicího uzlu a vybrané plochy je realizováno automaticky pomocí prutových konečnoprvkových elementů. V bodě *A* bylo zamezeno posuvu v osách *x*, *y* a *z* a také rotaci okolo os *x*, *y* a *z*. Při vytváření vazeb v bodech *B* a *C* byly nastaveny stejné vazební účinky jako u bodu *A* až na posuv v ose *x*, ve které byla přilbě ponechána volnost. Tímto byla umožněna deformace v ose *x*, která se projevila jako rozšíření přilby do stran.

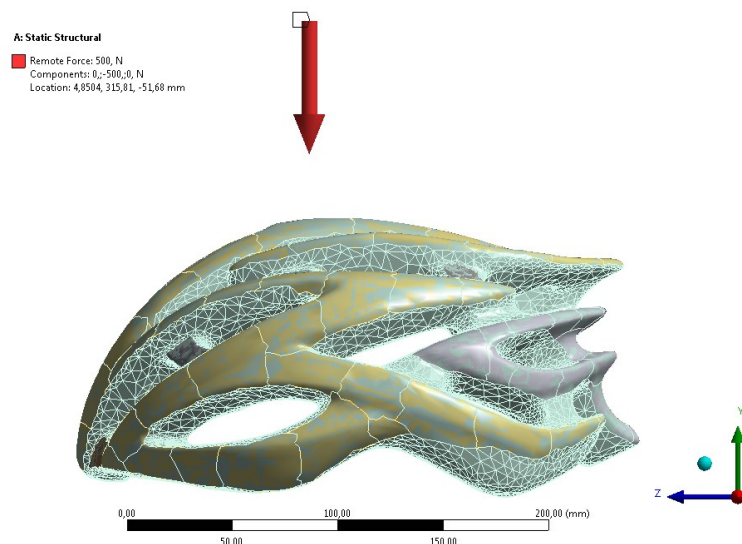


Obr. 7.7 – Vytvoření vazeb pomocí remote displacement

Tabulka 7.4 – Definování jednotlivých vazeb

vazba	Posuv v ose <i>x</i>	Posuv v ose <i>y</i>	Posuv v ose <i>z</i>	Rotace okolo <i>x</i>	Rotace okolo <i>y</i>	Rotace okolo <i>z</i>
<i>A</i>	0	0	0	0	0	0
<i>B</i>	free	0	0	0	0	0
<i>C</i>	free	0	0	0	0	0

Dalším krokem po vytvoření všech tří vazeb bylo přidání zatěžující síly o velikosti -500 N ve směru osy y pomocí funkce remote force, která měla simulovat zatížení způsobené tlakem zkušebního válečku na povrch přilby strojem Testometric M500 – 50CT při předešlém experimentu. Síla byla umístěna ve vzdálenosti 100 mm nad vybranou plochou ve středu helmy, na kterou působila. Díky tomuto umístění se pravidelně rozprostřela po celé vybrané ploše. Po vytvoření této osamělé síly již byly kompletně definovány všechny okrajové podmínky a mohl být zahájen samotný výpočet.



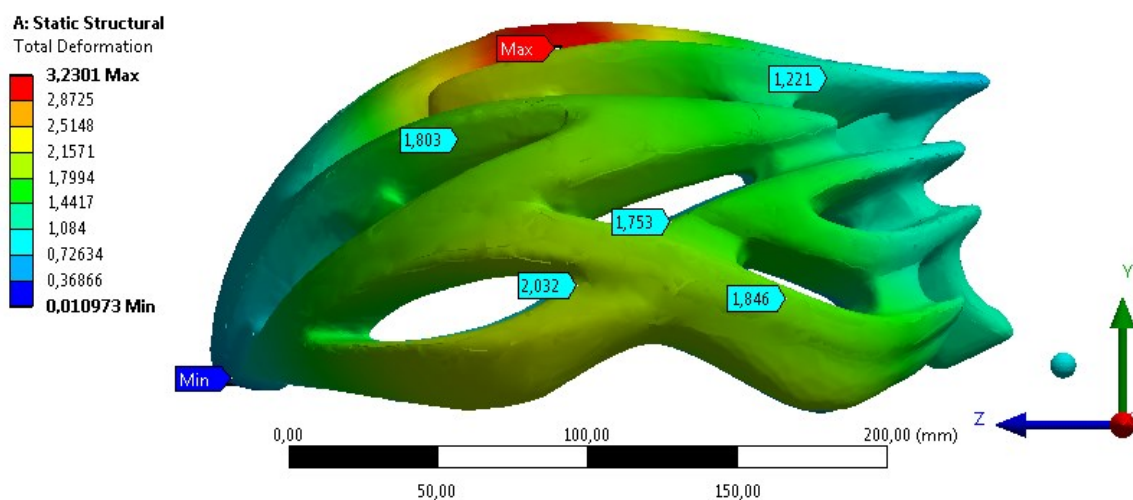
Obr. 7.8 – Zatížení vlivem remote force -500 N v ose y

Tabulka 7.5 – Definování zatěžující síly

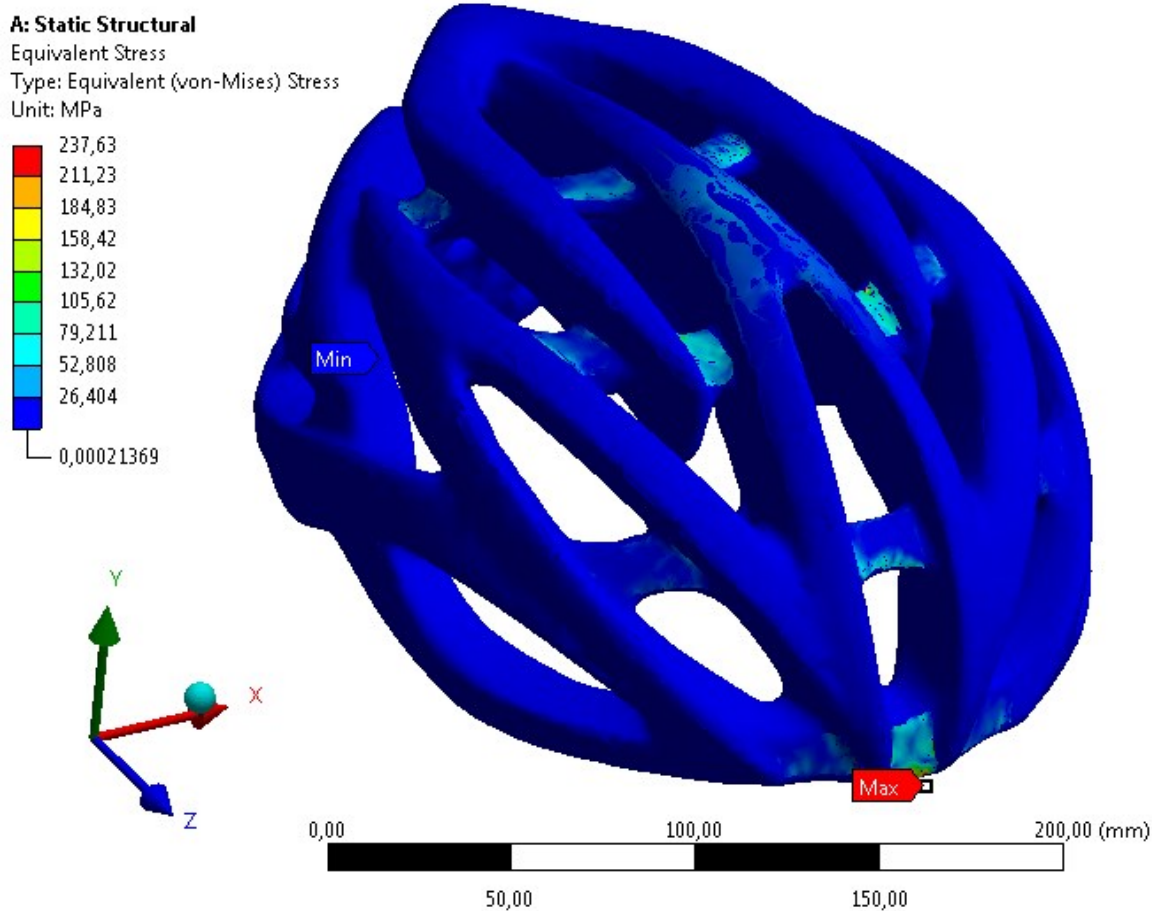
Síla	v ose x [N]	v ose y [N]	v ose z [N]
Remote force	0	-500	0

7.6 Vyhodnocení výsledků

Výpočet vlivem velkého množství prvků trval přibližně 15 minut při konfiguraci počítače obsahujícího procesor Intel® Xenon® CPU o maximální frekvenci 3,47 GHz a operační paměť kapacity 24 GB. Z důvodu ladění modulu pružnosti E bylo nutné provést opakované přepočítávání, než bylo dosaženo požadovaných výsledků. Nakonec se však povedlo definovat vlastnosti materiálů natolik, že rozdíl maximálního posunutí v místě pod působícím válečkem při experimentu a námi zvolenou zatěžující silou v případě výpočtu pomocí metody konečných prvků byl pouhých 0,63 mm, jelikož největší posunutí u experiment dosahovalo hodnoty 3,293 mm a u simulace tohoto experimentu pomocí MKP výpočtu vytvořeného v programu Ansys Workbench 18.0 bylo celkové posunutí ve stejném místě o hodnotě 3,23 mm. Z tohoto posunutí program následně dopočítal napětí, jehož maximální hodnota byla 237,63 MPa v místě podpěry A. Hodnota je však pouze lokální a umístěna pouze v jednom uzlu konečnoprvkové sítě. Tuto špičkovou hodnotu lze přisoudit přítomnosti okrajové podmínky.



Obr. 7.9 – Celkové posunutí



Obr. 7.10 – Ekvivalentní napětí (HMH)

Závěr

V této práci byl pro potřeby numerické analýzy nejprve vytvořen 3D STL model přilby, díky společnosti Invent Medical, jenž byla ochotna mne naučit pracovat se skenerem Artec Eva a programem Artec studio 10. Dalším důležitým poznatkem bylo získání vědomostí ohledně norem využívaných pro testování přileb a pro stanovení všeobecně platných kritérií na jejich konstrukci. Součástí práce byl experiment DICM, který sloužil ke správnému definování materiálových vlastností. Po vyhotovení experimentu následoval MKP výpočet, který simuloval samotný předešlý experiment. Výpočet mohl být považován za zdařilý, jelikož odchylka experimentu a numerického výpočtu byla pouhých 0,63 mm v rámci maximálního posunutí. Na základě získaných materiálových vlastností chování cyklistické přilby, můžeme aplikovat výpočet na jakýkoliv typ helmy.

Shrnutí nejdůležitějších poznatků práce:

- Byl proveden kompletní sken cyklistické přilby Giro Atmos zkoumané v této práci a zároveň sken lidské hlavy a porušené přilby, kterou se autor práce bude moct zabývat v navazujícím studiu. Skenování bylo možné uskutečnit díky spolupráci se zadavatelem bakalářské práce společností Invent Medical, která poskytla veškeré potřebné vybavení pro skenování a zároveň vyladila naskenovaný model do podoby použitelné v CAD systémech.
- Bylo provedeno materiálové a konstrukční řešení přilby s doporučením volit spíše tužší pěnu EPS a pro její spojení s ABS plastem využít technologie IN – Mold, popřípadě Double In – Mold v místech s největší pravděpodobností nárazu vlivem pádu cyklisty z kola.
- Ve spolupráci s doc. Ing. Radimem Halamou Ph.D byla realizována zkouška přilby spadající do oblasti experimentální teorie pružnosti. Jednalo se o optickou metodu digitální korelace obrazu, která sloužila pro zjištění chování přilby při zatížení. Díky zjištěnému celkovému posunutí bylo dále realizováno ladění samotného numerického výpočtu.
- Numerický výpočet byl proveden metodou konečných prvků v programu Ansys Workbench. 18. V tomto programu byla rovněž dotvořena geometrie v podobě plastové skořepiny a výztuh, které ovlivňují tuhost celé přilby. Probíhalo zde i samotné ladění mechanických vlastností materiálů přilby s cílem co největší shody MKP výpočtu s experimentem DICM.

Na základě výše uvedeného lze konstatovat, že:

- Byla zvládnuta technika přenosu reálného objektu do počítačové podoby využitelné pro numerické simulace pomocí metody konečných prvků,
- Byly získány mechanické vlastnosti materiálů používaných pro výrobu cyklistických přileb na základě dosažení shody mezi numerickou simulací a provedeným experimentem,
- Byl položen nutný základ pro realizaci časově závislých pokročilých analýz – např. dynamické pádové zkoušky, které autor práce zvažuje realizovat během svého dalšího studia.

Literatura

- [1] Polystyrene – Wikipedia. [online]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Polystyrene>
- [2] Akrylonitrilbutadienstyren – Wikipedie. [online]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Akrylonitrilbutadienstyren>
- [3] Uhlíkové vlákno – Wikipedie. [online]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Uhl%C3%ADkov%C3%A9_vl%C3%A1kno
- [4] *Helmets: Bicycle Helmets* [online]. Dostupné z: <http://helmets.org/molded.htm>
- [5] o 3D skenování. *3d-skenovani.cz* [online]. Dostupné z: <http://www.3d-skenovani.cz/o-3d-skenovani>
- [6] Skenování ve 3D – Artec EVA 3D skener. *Skenování ve 3D – 3D skenery a 3D skenování objektů* [online]. Copyright © [cit. 11.05.2017]. Dostupné z: <http://www.skenovanive3d.cz/skenery/artec-m-3d-skenery/artec-eva-3d-skener/>
- [7] ČSN EN 960 | ČSN online. *ČSN online pro jednotlivě registrované uživatele* [online]. Dostupné z: <https://csnonline.unmz.cz/Detailnormy.aspx?k=77728>
- [8] ČSN EN 1078+A1 | ČSN online. *ČSN online pro jednotlivě registrované uživatele* [online]. Dostupné z: <https://csnonline.unmz.cz/Detailnormy.aspx?k=92841>
- [9] *Výukové materiály | Matematika pro inženýry 21. století* [online]. Copyright © [cit. 11.05.2017]. Dostupné z: http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/pruznost_pevnost_obraz.pdf
- [10] *Vysoké učení technické v Brně* [online]. Copyright © [cit. 13.05.2017]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=41777
- [11] *Výukové materiály | Matematika pro inženýry 21. století* [online]. Copyright © [cit. 11.05.2017]. Dostupné z: http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/mkpa-mhp_obr.pdf
- [12] Úvod do MKP [online]. Copyright © [cit. 11.05.2017]. Dostupné z: https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/330/.content/files/UvodDoMKP_prednasky.pdf

- [13] MICKA, Michal, Josef JÍRA a Jitka JÍROVÁ. *MODELOVÁNÍ PÁDOVÉ ZKOUŠKY HELMY V ANSYS LS DYNA* [online]. ANSYS konference 2010 Frym-burk, 2010 [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: http://www.ansys.stuba.sk/ANSYS2010/prednasky/Ansys%20Mechanical/Micka_Modelovani_padove_zkousky_helmy_v_ansys_lsdyna.pdf
- [14] Young's Modulus is a Measure of Stiffness in Carbon Fibre. *Christine DeMerchant Site about Boats, boat plans Boatbuilding, Cats, and other good stuff* [online]. Dostupné z: <http://www.christinedemerchant.com/youngmodulus.html>
- [15] MILLS, N.J. a A. GILCHRIST. *Finite - element analysis of bicycle helmet oblique impacts* [online]. University of Birmingham, 2007 [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <http://www.birmingham.ac.uk/Documents/college-eps/metallurgy/perg/Documents/p157FEAbikehelmoblimpactsfweb150dpi.pdf>
- [16] Eliminate Football Concussion with Shocking Simulation · ANSYS. *ANSYS - Engineering Simulation Software* [online]. Dostupné z: <http://www.ansys-blog.com/reducing-concussions-in-football-with-simulation/>
- [17] Aeon Cycling Helmet - World Class Helmet Built for Racing Performance. [online]. Dostupné z: http://www.giro.com/eu_en/products/men/helmets/aeon.html
- [18] Synthe™ MIPS. [online]. Dostupné z: http://www.giro.com/eu_en/synthetm-mips.html/
- [19] Giro Atmos II Helmet - Helmets - Excel Sports. *Excel Sports - Online Bicycle Retailer* [online]. Copyright © 2017 Excel Sports [cit. 11.05.2017]. Dostupné z: <https://www.excelsports.com/main.asp?page=8&description=Atmos+II+Helmet&vendorCode=GIRO&major=3&minor=13>
- [20] Materials for Bicycle Helmets. *Granta Design: The materials information technology experts* [online]. Copyright © GRANTA DESIGN 2017 ALL RIGHTS RESERVED [cit. 11.05.2017]. Dostupné z: <http://www.grantadesign.com/resources/materials/casestudies/helmet.htm>
- [21] *Helmets: Bicycle Helmets* [online]. Dostupné z: <http://www.bhsi.org/liners.htm>

Seznam symbolů a zkratek

Zkratka	Definice
3D	3-dimensional - trojrozměrný
2D	2-dimensional - dvojrozměrný
EPS	expandovaný polystyren
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
CAD	Computer aided design – 2D a 3D počítačové projektování
MKP	Metoda konečných prvků
CCD	Charged – coupled – device – elektronická součástka
DICM	Digital image corellation method – Metoda korelace digitálního obrazu
Např.	například
Obr.	obrázek

Seznam tabulek

5.1	Rozměry a hmotnosti maket hlavy vztahující se k obrázku 5.1 [7].....	17
5.2	Velikosti maket hlavy [8].....	20
5.3	Pořadí zkoušky na zkušebních vzorcích [8].....	21
6.1	Závislost posunutí na zatěžující síle.....	27
7.1	Materiál pěny.....	33
7.2	Materiál skořepiny.....	33
7.3	Materiál výztuh.....	33
7.4	Definování jednotlivých vazeb.....	36
7.5	Definování zatěžující síly.....	37

Seznam obrázků

2.1	Schéma rozložení materiálů na testované přilbě.....	6
3.1	Double In-Mold technologie v čelní oblasti přilby.....	7
4.1	Skenování pomocí Artec Eva.....	9
4.2	3D skener Artec Eva [6].....	9
4.3	Sít' helmy.....	10
4.4	Naskenované plochy	10
4.5	Spojení snímků.....	10
4.6	Výsledný model skenování.....	11
4.7	Finální verze modelu přilby po doladění geometrie.....	11
4.8	Sken hlavy s vycentrovanou přilbou.....	12
4.9	Skenování praskliny pomocí Atos Core.....	13
4.10	Skenování praskliny pomocí Atos Core.....	13
4.11	Prasklina zachycená v Atos Professional.....	13
4.12	Sloučení praskliny a výsledného modelu.....	13
4.13	STL geometrie cyklistické přilby.....	14
4.14	Detail trojúhelníkové STL sítě.....	14
5.1	Řez vertikální rovinou [7].....	16
5.2	Řez maketou hlavy v podélné rovině [8].....	19
5.3	Řez maketou hlavy ve vztážené rovině [8].....	19
5.4	Vymezení zkušební oblasti [8].....	21
5.5	Zkušební zařízení pro stanovení schopnosti tlumení nárazu [8].....	22
6.1	Posun bodu vlivem deformace [10].....	24
6.2	Přetvoření bodu v rovině [10].....	24
6.3	Přilba nabarvená na bílou barvu.....	25
6.4	Přilba s nanesenými body.....	25
6.5	Testometric M500 s ustavenou přilbou zaměřenou kamerami a reflektory.....	25
6.6	Mapa bodů.....	26
6.7	Kalibrace za pomoci mřížky.....	26
6.8	Vyšetřovaná plocha.....	28
6.9	Vyhodnocení plochy– poměrné deformace ε_{xz}	28
6.10	Celkové posunutí helmy při zatížení 500 N.....	29
6.11	Deformace přilby ε_1	31
6.12	Deformace přilby ε_2	31
6.13	Deformace přilby ε_3	31
7.1	Vytvořená plocha pro skořepinu.....	34
7.2	14 malých plošek pro výztuhy.....	34
7.3	Vytvoření povrchů funkcí surfaces from faces.....	34
7.4	Vysít'ovaný objem pěny EPS.....	35
7.5	Vysít'ovaná skořepina.....	35
7.6	Vysít'ované výztuhy.....	35
7.7	Vytvoření vazeb pomocí remote displacement.....	36
7.8	Zatížení vlivem remote force -500 N v ose y.....	37
7.9,10	Celkové posunutí, Ekvivalentní napětí (HMH).....	38